



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公開本

(11)公開編號：TW 202341018 A

(43)公開日：中華民國 112 (2023) 年 10 月 16 日

(21)申請案號：111140313

(22)申請日：中華民國 111 (2022) 年 10 月 24 日

(51)Int. Cl.：

G06N10/20 (2022.01)

G06N10/40 (2022.01)

G06F30/20 (2020.01)

G06F30/3308(2020.01)

G06F30/39 (2020.01)

(30)優先權：2021/10/24

澳大利亞

2021903398

2022/06/22

澳大利亞

2022901715

(71)申請人：澳洲商矽基量子計算有限公司 (澳大利亞) SILICON QUANTUM COMPUTING PTY LIMITED (AU)

澳大利亞

(72)發明人：高爾曼 山謬基斯 GORMAN, SAMUEL KEITH (AU)；西蒙斯 蜜雪兒伊凡

SIMMONS, MICHELLE YVONNE (AU)；科澤爾 喬瑞斯 KEIZER, JORIS (NL)；

耿 海倫 GENG, HELEN (AU)；鄭柳善 CHUNG, YOUSUN (KR)；唐納利 馬

修 DONNELLY, MATTHEW (AU)；卡辛斯基 米契爾 KICZYNSKI, MITCHELL

(AU)；邁爾斯 凱西 MYERS, CASEY (AU)；薩瑟蘭 山姆 SUTHERLAND, SAM

(GB)

(74)代理人：李世章；彭國洋

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：25 項 圖式數：12 共 65 頁

(54)名稱

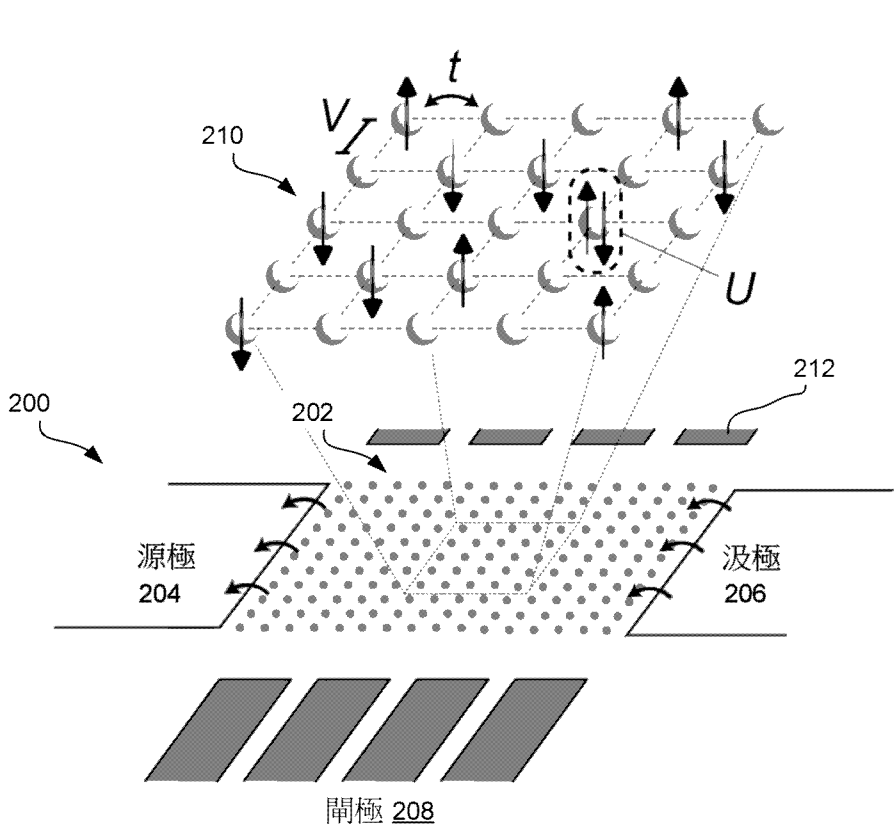
用於模擬量子計算的方法及系統

(57)摘要

本揭露的態樣涉及用於模擬量子系統(AQS)的製造方法。本揭露的其他態樣涉及用於使用 AQS 來解決計算問題的方法。用於製造 AQS 的方法包括基於一計算問題產生一哈密頓算符，該計算問題可為最佳化問題或模擬問題。此外，該方法包括基於一或多種已識別的量測方法及該哈密頓算符識別 AQS 製造參數。最後，可基於該等已識別的製造參數來製造 AQS。AQS 尤其可用於模擬電池或界面。

Aspects of the present disclosure are directed to fabrication methods for analogue quantum systems (AQSs). Further aspects of the present disclosure are directed to methods for solving computational problems using an AQS. Methods for fabricating an AQS include generating a Hamiltonian based on a computational problem, which may be an optimization problem or a simulation problem. Further, the method includes identifying AQS fabrication parameters based on one or more identified measurement methods and the Hamiltonian. Lastly, an AQS can be fabricated based on the identified fabrication parameters. An AQS may be used inter alia to simulate a battery or interfaces.

指定代表圖：



符號簡單說明：
200:AQS
202:量子點陣列
204:源極
206:汲極
208:控制閘極
212:感測器

第2圖

【發明摘要】

【中文發明名稱】

用於模擬量子計算的方法及系統

【英文發明名稱】

METHODS AND SYSTEMS FOR ANALOGUE
QUANTUM COMPUTING

【中文】

本揭露的態樣涉及用於模擬量子系統(AQS)的製造方法。本揭露的其他態樣涉及用於使用AQS來解決計算問題的方法。用於製造AQS的方法包括基於一計算問題產生一哈密頓算符，該計算問題可為最佳化問題或模擬問題。此外，該方法包括基於一或多種已識別的量測方法及該哈密頓算符識別AQS製造參數。最後，可基於該等已識別的製造參數來製造AQS。AQS尤其可用於模擬電池或界面。

【英文】

Aspects of the present disclosure are directed to fabrication methods for analogue quantum systems (AQSs). Further aspects of the present disclosure are directed to methods for solving computational problems using an AQS. Methods for fabricating an AQS include generating a Hamiltonian based on a computational problem, which may be an optimization problem or a simulation problem. Further, the method includes identifying AQS fabrication parameters based on one or more identified measurement methods and the Hamiltonian. Lastly, an AQS can be fabricated based on the identified fabrication parameters. An AQS may be used inter alia to simulate a battery or interfaces.

【指定代表圖】第(2)圖。

【代表圖之符號簡單說明】

2 0 0 : A Q S

2 0 2 : 量 子 點 陣 列

2 0 4 : 源 極

2 0 6 : 汲 極

2 0 8 : 控 制 閘 極

2 1 2 : 感 測 器

【特徵化學式】

無

【發明說明書】

【中文發明名稱】

用於模擬量子計算的方法及系統

【英文發明名稱】

METHODS AND SYSTEMS FOR ANALOGUE QUANTUM COMPUTING

【技術領域】

【0001】 本揭露的態樣係關於量子計算，且更特定而言係關於用於模擬量子計算的方法及系統。

【先前技術】

【0002】 隨著量子計算平台開發的最新進展，利用量子裝置來進行複雜量子系統的實際模擬且解決最佳化問題的可能性正在成為現實。

【0003】 目前還不可能實施完全容錯的量子演算法。然而，量子模擬係可能的，但量子雜訊及去相干顯著限制可在現有平台上有效執行的操作的數目。這就是如今所謂的NISQ(有雜訊中型量子)時代，在這個時代，在量子電腦上進行模擬或最佳化係可能的，但演算法及任務需要適應雜訊。由於此雜訊，許多標準演算法無法在量子計算裝置中執行，而其他演算法似乎特別適合NISQ情境。例如，某些模擬及最佳化問題特別適合於NISQ情境。

【0004】 專門構建(或硬編碼)來執行一或多個特定問題的量子計算系統被稱為模擬量子電腦。最近已構建此類模擬量子電腦來實現費米哈巴德模型，模擬磁性，且模擬拓撲

相。然而，設計且構建此類模擬量子電腦來解決特定的模擬或最佳化問題通常非常困難。

【發明內容】

【0005】 根據本發明的第一態樣，提供了一種用於製造模擬量子系統的方法，該方法包括：基於計算問題產生哈密頓算符，關於該計算問題，使用一或多種已識別的量測方法尋求解決方案；基於該一或多種已識別的量測方法及該哈密頓算符識別用於該模擬量子系統的模擬量子系統製造參數；以及基於該等已識別的模擬量子系統製造參數來製造該模擬量子系統。

【0006】 根據本發明的第二態樣，提供了一種用於製造用於模擬電池的模擬量子系統的方法，該方法包括：基於模擬該電池的計算問題產生哈密頓算符；基於該哈密頓算符識別用於該模擬量子系統的系統製造參數且通常使用四點探針量測來量測第一量子點陣列與第二量子點陣列之間的電壓及/或電容；以及基於該等已識別的系統製造參數來製造該模擬量子系統。

【0007】 根據本發明的第三態樣，提供了一種用於製造用於模擬至少一個界面的模擬量子系統的方法，該方法包括：基於模擬界面的計算問題產生哈密頓算符；基於該哈密頓算符識別用於該模擬量子系統的系統製造參數且通常使用四點探針量測來量測第一量子點陣列與第二量子點陣列之間的至少一個界面之間的電壓及/或電容；以及基於該等已識別的系統製造參數來製造該模擬量子系統。

【0008】 根據本發明的第四態樣，提供了一種用於解決計算問題的方法，該方法包括：提供模擬量子系統，該模擬量子系統包括：量子點陣列，該量子點陣列模擬費米哈巴德模型；複數個控制閘極，該複數個控制閘極用於改變哈巴德哈密頓算符參數；以及一或多個源極引線及汲極引線，該一或多個源極引線及汲極引線用於量測通過該量子點陣列的電流；應用選定的量測方法來量測該模擬量子系統的一或多個性質；以及解釋該模擬量子系統的所量測的一或多個性質以判定該計算問題的解決方案。

【0009】 根據本發明的第五態樣，提供了一種用於解決模擬電池的計算問題的方法，該方法包括：提供模擬量子系統，該模擬量子系統包括：至少兩個量子點陣列，該至少兩個量子點陣列模擬費米哈巴德模型；複數個控制閘極，該複數個控制閘極用於改變哈巴德哈密頓算符參數；以及一或多個源極引線及汲極引線，該一或多個源極引線及汲極引線用於量測通過該陣列的電流；使用四點探針量測來量測第一量子點陣列與第二量子點陣列之間的電壓及/電容；以及解釋該模擬量子系統的所量測的電壓及/或電容以判定該計算問題的解決方案。

【0010】 根據本發明的第六態樣，提供了一種用於解決模擬至少一個界面的計算問題的方法，該方法包括：提供模擬量子系統，該模擬量子系統包括：至少兩個量子點陣列，該至少兩個量子點陣列模擬費米哈巴德模型；界面，該界面界定於該至少兩個量子點陣列之間；複數個控制閘極，

該複數個控制閘極用於改變哈巴德哈密頓算符參數；以及一或多個源極引線及汲極引線，該一或多個源極引線及汲極引線用於量測通過該至少兩個量子點陣列的電流；應用四點探針量測來量測該界面上的電壓及/或電容；以及解釋該模擬量子系統的所量測的電壓/電容以判定模擬至少一個界面的該計算問題的解決方案。

【0011】 本揭露的其他態樣及在緊接在前面的段落中概述的態樣的實施例將從以下詳細描述及附圖顯而易見。

【圖式簡單說明】

【0012】 本發明的特徵及優點將從以下參考隨附圖式僅以舉例的方式對其實施例進行的描述變得顯而易見，在圖式中：

【0013】 第1A圖及第1B圖展示兩個示例性先前技術施體量子點系統。

【0014】 第2圖展示根據本揭露的態樣的示例性模擬量子系統 (Analogue Quantum System, AQS)。

【0015】 第3圖示出一些示例性一維、二維及三維量子點陣列結構。

【0016】 第4圖係示出根據本揭露的態樣的用於判定用於AQS的製造參數的示例性方法的流程圖。

【0017】 第5圖係示出根據本揭露的態樣的用於使用AQS的示例性方法的流程圖。

【0018】 第6A圖至第6D圖係展示應用於不同模擬量子系統以量測AQS的選定性質的不同量測技術的示意圖。

【0019】 第 7 A 圖展示在平凡相中的具有交錯隧道耦合的示例性一維晶格。

【0020】 第 7 B 圖展示在拓撲非平凡相中的具有交錯隧道耦合的示例性一維晶格。

【0021】 第 8 A 圖及第 8 B 圖分別展示用於模擬用於拓撲平凡相及拓撲非平凡相的 SSH 模型的示例性 AQS 裝置。

【0022】 第 8 C 圖展示量子點、源極引線、汲極引線及閘極的示例性線性排列。

【0023】 第 9 A 圖展示用於模擬 SSH 模型的拓撲平凡相的 AQS 裝置的 STM 顯微照片。

【0024】 第 9 B 圖展示用於對準量子點陣列中的量子點的協定的示意圖。

【0025】 第 9 C 圖展示針對恆定源極汲極偏壓在第一次反覆(頂部圖集)及第十次反覆(底部圖集)上的各個閘極掃描的實例。

【0026】 第 9 D 圖展示每次反覆在每個閘極上的電壓。

【0027】 第 9 E 圖展示每次反覆在每個閘極掃描上量測的最大電流。

【0028】 第 10 A 圖展示依隧道耦合比率而變的正規化對數(電導)的理論圖(位點間庫侖交互作用由 $1/d^{1.5}$ 相依性給出，其中 d 為量子點間距)，裝置 I 由紅色虛線給出，且裝置 II 由藍色虛線給出。

【0029】 第 10 B 圖展示在平凡相中，在使所有量子點的電化學電位偏移時，在零源極汲極偏壓下獲得的電導跡線。

【0030】 第 10 C 圖展示平凡組態的依組合閘極電壓而變的哈巴德模型的多體本征能量的佔有概率。

【0031】 第 10 D 圖展示從實驗結果提取的 S_i 值用於從哈巴德模型及比較理論值獲得參數。

【0032】 第 10 E 圖展示在非平凡相中，在使所有量子點的電化學電位偏移時，在零源極汲極偏壓下獲得的電導跡線。

【0033】 第 10 F 圖展示在拓撲相中，四分之一填充間隙幾乎完全消失，從 $m + 4$ 狀態至 $m + 6$ 狀態的急劇轉變僅由兩個相隔約 0.2 meV 的電導峰給出。

【0034】 第 10 G 圖展示非平凡相的依組合閘極電壓而變的哈巴德模型的多體本征能量的佔有概率。

【0035】 第 11 圖展示兩個量子點陣列之間的四個示例性界面。界面可具有無無序、原子無序或連續無序。

【0036】 第 12 A 圖展示經設計來量測模擬電池操作的兩個量子點陣列之間的平衡電壓的霍爾棒量測的示意圖。

【0037】 第 12 B 圖展示依閘極電壓的調諧而變的平衡電壓的曲線圖。

【實施方式】

【0038】 在量子力學中，系統的哈密頓算符係對應於該系統的總能量（包括動能及位能兩者）的算符。系統的頻譜，即系統的能譜或其能量本征值的集合，係可從系統的總能量的量測獲得的可能結果的集合。由於它與系統的能譜及時間演化密切相關，因此它在量子理論的大多數公式中具有根本的重要性。

【0039】 哈巴德模型係所使用的近似模型，其描述晶格上一組空間局部軌道上的重複的交互作用的電子（或費米子）。哈巴德模型對理解固態物理學領域的量子材料中的電子關聯發揮著示範作用。它可用於描述導電系統與絕緣系統之間的轉變，特別是對於具有強電子關聯的系統。哈巴德模型係晶格中交互作用的粒子的簡單模型，在哈密頓算符中僅有兩項：允許粒子在晶格的位點之間穿隧（「跳躍」）的動力學項及由位點上交相互作用組成的電位項。若包括晶格的不同位點處的粒子之間的交互作用，則模型通常被稱為「擴展哈巴德模型」。特定而言，最常見地由 U 表示的哈巴德項表示位點上交相互作用能，且 V 表示位點間交互作用能。動力學跳躍項被表示為 t ，且可包括最近鄰跳躍及 / 或在相隔更遠的晶格位點之間的跳躍。

【0040】 一般最近鄰哈巴德哈密頓算符由下式給出：

$$H = \sum_{\langle i,j \rangle} t_{ij} c_i^\dagger c_j + \sum_i U_i n_i (n_i - 1) + \sum_{i < j} V_{ij} n_i n_j - \sum_i \mu_i n_i \quad (1)$$

【0041】 其中，電子跳躍項 (t_{ij}) 與電子在晶位位點之間的穿隧概率有關。位點內庫侖交互作用 (U_i) 係將第二個電子添加至位點所需的能量。位點間庫侖交互作用 (V_{ij}) 係將電子添加至相鄰位點所需的能量，包括所有位點對 i 及 j 上的交互作用。最後， μ_i 係位點 i 的化學電位。算符 $c_i^\dagger c_i$ 係第 i 個位點的費米子產生及湮滅算符， $n_i = c_i^\dagger c_i$ 係位點 i 的數字算符，且 $\sum_{\langle i,j \rangle}$ 表示相鄰位點 i 及 j 上的總和。對於足夠大的 $U_i \gg V_{ij}, t_{ij}, \mu_i$ ，確保 $n_i \in \{0, 1\}$ 。應當理解，上文所示

的模型係未考慮電子自旋的無自旋模型。然而，本揭露的態樣不需要局限於這種類型的模型，且可基於自旋哈巴德哈密頓算符同樣容易地實施。

【0042】 從方程式 1 可清楚地看出，可認為一般哈巴德哈密頓算符包括：電子跳躍項 $\sum_{\langle ij \rangle} t_{ij} c_i^\dagger c_j$ 、位點上電子關聯項 $\sum_i U_i n_i (n_i - 1)$ 、位點間電子關聯項 $\sum_{i < j} V_{ij} n_i n_j$ ，及電化學項 $\sum_i \mu_i n_i$ 。

【0043】 儘管它明顯很簡單，但哈巴德模型已證明能夠預測與凝態物質物理及化學相關的廣泛範圍的複雜現象。遺憾的是，已知找到由哈巴德模型描述的系統的基態能量在計算上很難，即使使用量子電腦。因此，模擬哈巴德模型的甚至小尺寸實例的能力在許多科學領域都令人很感興趣。

【0044】 半導體量子點提供高度可控的平台，該平台可用於直接模擬固態架構中的哈巴德模型。特定而言，磷摻雜的矽量子點由於其實體尺寸小而具有強的交互作用，從而允許研究許多基本的凝態物質相。由於此等量子點可直接模擬哈巴德模型，該哈巴德模型已證明係量子 Merlin-Arthur (Quantum Merlin-Arthur, QMA) 完整的，因此它們可用於執行多個模擬及最佳化問題，因為此等問題通常亦可由哈巴德模型定義。

【0045】 本揭露的一些態樣提供了判定裝置製造參數以構建模擬量子系統 (analog quantum system, AQS) 來解

決特定計算問題的新方法。此外，本揭露的態樣提供了用於使用製造的AQS來解決特定計算問題的方法。

【0046】 為了構建AQS，本揭露的態樣最初識別用於基於需要解決的給定計算問題來獲得解決方案的一或多種量測方法。例如，基於給定計算問題，諸如二次連續最佳化問題，可判定問題的解決方案在於量測量子點陣列的基態能量及通過量子點陣列的電流。在其他實例中可判定，計算問題的解決方案可藉由以下各項來判定：量測AQS的電子傳輸概率、使用四點探針量測來量測至少一個量子點陣列上的電壓及/或電容、或量測AQS的量子位元的電子佔有。

【0047】 然後可使用已識別的量測方法及哈巴德哈密頓算符來識別某些裝置製造參數(例如，閘極/源極/汲極/感測器的數目/幾何形狀、裝置層的數目/裝置的維度、量子點的數目、點的大小、量子點的排列等)。一旦以此方式識別了裝置製造參數，就可製造AQS。

【0048】 為了執行計算，將給定的計算問題映射至哈巴德哈密頓算符上，以藉由執行已識別的量測方法來找到計算問題的解決方案。其中哈巴德哈密頓算符的參數包括跳躍項(t)、位點內關聯能(U)、位點間關聯能(V)、化學電位(μ)。除了哈密頓算符參數之外，其他因素亦可影響裝置製造參數，例如，系統的溫度(T)及總體外部磁場強度(B)。

【0049】 特定而言，在本揭露的態樣中，藉由使用靜電閘極改變AQS中的量子點的幾何形狀及/或該等點的電化學電位，可改變哈巴德哈密頓算符的相關參數，已知其難以

用傳統方式模擬。例如，藉由改變 A Q S 中的量子點的大小，哈巴德哈密頓算符的位點上能量 U 可從 1 meV 至 100 meV 變化。藉由改變 A Q S 中的位點間間距/幾何形狀，隧道耦合參數 t 可從 0.001 meV 至 10 meV 變化。藉由改變多個頻帶上的單粒子能階，可改變哈巴德哈密頓算符的能階 μ 。因而，電化學電位項(與 n_i 成比例)的能量變化可遠大於 U 、 V 及 t 。藉由改變位點間間距/幾何形狀，哈巴德哈密頓算符的位點間能量 V 可從 0.01 meV 至 20 meV 變化。藉由改變電子溫度，溫度 T 可從 0.01 K 至 50 K 變化。此外，總體外部電磁場 γB (γ 係電子旋磁比)可從 0 meV 至 1 meV 變化，且電子填充可跨位點上電子交互作用項的多個值而變化。

示例性 A Q S

【0050】 第 1 A 圖展示可在本揭露的 A Q S 中實施的示例性半導體量子點。如圖中所示，量子點裝置 100 形成為包括半導體基板 102 及介電質 104 的結構。在此實例中，基板係同位素純化的矽(矽-28)，且介電質係二氧化矽。在其他實例中，基板可為矽(Si)。在基板 102 及介電質 104 相遇的地方形成界面 106。在此實例中，界面係 Si/SiO₂ 界面。為了形成量子點 100，施體原子 108 位於基板 102 內。可使用奈米製造技術(諸如由掃描隧道顯微鏡提供的氬微影術，或工業標準離子植入技術)將施體原子 108 引入至基板中。在一些實例中，施體原子 108 可為矽基板中的磷原子且量子點 100 可被稱為 Si:P 量子點。在圖 1 中描繪的實例中，量子點 100 包括嵌入矽-28 晶體中的單個施體原子

108。在其他實例中，量子點可包括彼此緊密接近地嵌入的多個施體原子。

【0051】 閘極112及114可用於調諧量子點100上的電子填充。例如，可由閘電極例如112將電子110載入至量子點100上。電子110的物理狀態由波函數116描述，該波函數被定義為在特定位置發現電子的概率幅度。矽中的施體量子位元依靠使用由施體原子核自然形成的電位井來束縛電子自旋。

【0052】 第1B圖展示可在本揭露的量子加速器中實施的另一個示例性半導體量子點150。這與第1A圖中所示的量子點100類似，不同之處在於閘極的放置。在第1A圖中，閘極112、114放置於介電質104的頂部。在此實例中，閘極152位於半導體基板102內。在一些實施例中，閘極152放置於與施體點108相同的平面內。在其他實施例中，閘極152可放置於不同的平面內。此類平面內閘極可經由金屬介層孔(未示出)連接至基板的表面。可將電壓施加至閘電極152以將一或多個電子110局限在施體原子108的庫侖電位中。

【0053】 第2圖展示根據本揭露的態樣的示例性AQS 200。AQS 200包括施體量子點陣列202、源極204、汲極206及多個控制閘電極208。在一個實例中，量子點陣列202包括施體量子點陣列，其中每個量子點類似於第1A圖或第1B圖中所示的量子點。第2圖中的插圖210展示量子點陣列202的5x5部分的放大視圖。如插圖中所見，量子點

排列成方形晶格。插圖中的圓圈中之每一者表示量子點，且量子點中的箭頭表示耦合至量子點的施體原子的電子，電子處於向上自旋或向下自旋狀態。

【0054】 插圖 210 亦展示描述量子點陣列 202 中的電子行為的擴展哈巴德哈密頓算符(即，基礎數學描述)的一些參數。特定而言，插圖 210 展示兩個量子點之間的遠距電子-電子交互作用(V)、單個量子點上的一對電子之間的位點上庫侖交互作用(U)以及兩個相鄰量子點之間的最近鄰電子傳輸(t)。方程式 1 中的哈密頓算符描述此系統。

【0055】 AQS 200 可用於藉由控制位點上交交互作用 U 、位點間交互作用 V 、隧道耦合 t 以及電化學電位 μ 來對模擬及最佳化問題進行編碼。

【0056】 第 2 圖展示量子點陣列 202 的方形 2D 結構。這種方形陣列量子點陣列 202 設計可用於在高溫超導電性方面模擬諸如氧化銅平面的低維材料。然而，應當理解，量子點陣列 202 不必為方形 2D 結構。相反，量子點可能以其他形式/結構定位在陣列 202 中。

【0057】 第 3 圖描繪一些示例性量子點陣列結構，諸如由具有開放邊界條件的隧道耦合量子點組成的 1D 開放陣列 302 或具有封閉邊界條件的 1D 封閉陣列 304，該 1D 封閉陣列可用於研究計算問題(諸如量子環及 1D 晶體)的週期性哈密頓算符。此外，量子點可構造成多個其他 2D 結構，用於解決複雜的最佳化或模擬問題。此類結構包括 2D 六邊形陣列 306、2D 矩形陣列 308 或 2D 傾斜陣列 310。在其他實例

中，陣列可具有完全任意的結構 312，該結構亦可用於複雜的最佳化問題。此外，陣列 202 中存在的量子點 100 的數目可根據特定的實施方案而變化。

【0058】 儘管在此實例(第2圖)中展示單個源極 204 及單個汲極 206，但情況不必總是如此。在其他實施例中，AQS 200 可包括複數個汲極及/或源極引線。此外，AQS 200 中使用的控制閘極 208 的數目可變化。

【0059】 更進一步，量子點陣列 202 可製造為 1D 或 2D，其中輸入閘電極 208 與陣列 202 在平面內(如第1B圖所示)，且/或製造為 3D，其中可在用磊晶過度矽生長量子點陣列層之後將閘極 208 圖案化於第二層上。Si:P 量子點的超低閘極密度允許製造具有幾個控制電極的大型量子點陣列。

【0060】 量子點陣列 202 弱耦合至源極 204 及汲極 206 以量測通過量子點陣列 202 的電子傳輸。此外，量子點陣列 202 電容耦合至複數個控制閘極 208。控制閘極 208 可用於調諧量子點陣列 202 的電子填充、點間耦合及單粒子能階。

【0061】 除了源極、汲極及控制閘極之外，在一些實施例中，AQS 200 可進一步包括一或多個感測器。例如，單獨的閘電極 208 可用作感測器。替代地，感測器 212 可為單電子電晶體 SET，或單引線量子點(single lead quantum dot, SLQD)。感測器可經組態來執行自旋讀出。在一些實施例中，感測器可為單獨的電荷感測器，且在其他實施例中，兩個或更多個控制閘極 208 可用於分散地感量量子位元的電荷。電荷感測器可用各種結構來實施。可使用的電荷感

測器的實例為：單電子電晶體(single electron transistor, SET)、單電子盒(single electron box, SEB)及隧道接面。專用電荷感測器的使用允許直接自旋讀出。然而，使用附近閘極208進行的分散讀出降低了裝置複雜性，且相反，量測量子位元的電荷狀態。

【0062】 儘管第1圖至第2圖描繪表面或平面內閘極，但情況不必總是如此。藉由使用平面內閘極，與表面閘極相比，可減少控制給定量子點陣列中的量子位元所需的閘極的數目。然而，在一些實例中，AQS 200可包括總體控制，例如，藉由使用可放置在量子點陣列202附近的環隙諧振器或微波諧振器來引導所需的磁場來控制AQS 200的量子位元。

製造AQS

【0063】 第4圖係示出根據本揭露的態樣的用於判定用於AQS 200的製造參數的示例性方法400的流程圖。

【0064】 方法400在步驟402開始，在此步驟中識別用於基於需要解決的給定計算問題來獲得解決方案的一或多種量測方法。藉由問題的性質來判定量測方法。例如，基於給定計算問題，諸如二次連續最佳化問題，可判定問題的解決方案在於量測AQS的量子點陣列202的基態能量及量測通過量子點陣列202的電流。在另一實例中可判定，計算問題的解決方案可藉由以下各項來判定：量測量子點陣列202的電子傳輸概率、使用四點探針量測來量測電壓及/或電容、或量測量子點陣列202中的量子位元的電子佔有。

【0065】 接下來，在步驟404處，將選定的計算問題映射至哈巴德哈密頓算符。此步驟可被視為將計算問題「編碼」成哈巴德哈密頓算符。哈巴德模型的普遍性允許將任何計算問題映射至哈巴德哈密頓算符(即，基礎數學描述)。例如，若計算問題係化學模擬，則該問題將具有與其相關聯的哈密頓算符。一些化學模擬問題(諸如模擬SSH模型)可直接映射至哈巴德模型以判定問題的哈密頓算符。其他化學模擬實例可需要向哈巴德模型的更複雜的轉換以判定問題的哈密頓算符。將計算問題映射至哈巴德哈密頓算符可將任何量子計算的輸出編碼於其基態(或其動力學)中。例如，許多最佳化問題可直接映射至哈巴德哈密頓算符，使得位點的佔有數係問題的解決方案。

【0066】 舉例而言，若裝置製造成使得 $U_i > V_{ij} \gg t_{ij}, \forall i, j$ ，則電子在填充相同量子點之前優先填充整個量子點陣列。在這種限制下，可忽略電子跳躍項(t)，因為它的能量遠小於哈密頓算符中的其他項，且因此哈巴德哈密頓算符成為二次無約束二元最佳化(quadratic unconstrained binary optimisation, QUBO)哈密頓算符：

$$H_{QUBO} = \sum_{i < j} V_{ij} n_i n_j - \sum_i \mu_i n_i \quad (2)$$

【0067】 然後選擇AQS 200中的量子點的距離及大小來複製此QUBO哈密頓算符的參數，且以此方式構造裝置，然後進行量測。

【0068】 替代地，若裝置構造成使得 $U_i > t_{ij} \gg V_{ij}, \forall i, j$ ，則可忽略位點間交互作用，因為哈密頓算符中的其餘項佔主導地位。因此，將哈巴德哈密頓算符簡化為 X Y 哈密頓算符：

$$H_{QCO} = -\sum_i \mu_i \frac{1 - \sigma_i^z}{2} + \sum_{\langle i,j \rangle} t_{ij} \frac{\sigma_i^x \sigma_j^x + \sigma_i^y \sigma_j^y}{4} \quad (3)$$

在此類情況下，量子點的佔有為 0 或 1，因為將超過 1 個電子添加至位點的成本大於用 1 個電子填充量子點陣列的其餘部分的成本。因此，佔有可解釋為自旋半粒子，其中 $|0\rangle = |\downarrow\rangle$ 且 $|1\rangle = |\uparrow\rangle$ 。由此，產生及湮滅 ($a^\dagger$ 及 a) 的轉換可如下進行：

$$c_j = \frac{\omega_x^j + i\omega_y^j}{2} \quad (4)$$

$$c_j^\dagger = \frac{\omega_x^j - i\omega_y^j}{2} \quad (5)$$

$$n_j = c_j^\dagger c_j = \frac{1 - \omega_z^j}{2} \quad (6)$$

【0069】 且判定的哈密頓算符如下。

【0070】 此模型可用於解決 QCO (二次連續最佳化) 問題。在 $V_{ij} \approx t_{ij}$ (即，它們的量值相似) 的狀態下， V_{ij} 及 t_{ij} 都必須保留在哈密頓算符中。因而，可解決更複雜的混合問題，諸如 MBO 問題 (混合二元最佳化問題)。這可用於具有二元及連續變量的最佳化問題，或引入 QUBO 中不可用的約束，例如不等式約束。MBO 問題的一個特定實例可為交易結算問題。

【0071】 最後，若 U 不夠大，則哈密頓算符描述 n 向量模型，該 n 向量模型可再次用於更複雜的最佳化任務。在此狀態下，在單個點獲得超過一個電子之前填充整個量子點陣

列 2 0 2 未必在能量上有利。這意謂問題不再為二元的，且基態將表示某種具有更複雜的交互作用之更複雜的問題。

【0072】 在步驟 4 0 6 處，可基於選定的量測技術且基於在步驟 4 0 4 處藉由映射判定的哈密頓算符的參數來判定裝置的製造參數。

【0073】 因此，一旦已經針對問題判定哈密頓算符，就將 A Q S 2 0 0 的量子點 1 0 0、1 5 0 放置成使得此等點經歷的哈密頓算符係判定的哈密頓算符。此係藉由排列量子點，使得它們之間的距離對應於耦合強度且它們的大小及 / 或定向引起適當的庫侖交互作用來達成的。

【0074】 例如，若計算問題涉及研究銅酸鹽系統的 C u O 平面中超導電性的存在，則相關量測方法將需要提供 2 D 陣列的總體超導相的資訊。因此，與此計算問題相關的量測方法可為類似「霍爾棒」的量測，因為這允許存取大型陣列的總體性質。應當理解，霍爾棒係四點探針量測的特定實施方案。

【0075】 選擇量子點的數目、大小及放置來模擬銅酸鹽系統中的 C u O 平面。特定而言，在 U/t 約為 5 的中間耦合狀態下，已在單頻帶哈巴德模型中預測了超導電性。這設定了量子點的大小及間距。量子點陣列應模仿 C u O 晶格，因此量子點應排列成方形晶格。量子點的數目係任意的，但一般而言，陣列越大，越不容易出現無序 / 邊緣效應。

【0076】 選定的量測技術可判定源極 2 0 4、汲極 2 0 6、閘極 2 0 8 及感測器 2 1 2 的數目及幾何形狀。例如，若選定的量

測技術係量測量量子點陣列 202 中的量子位元的電子佔有，則可判定需要一或多個感測器來量測電子佔有。替代地，若選定的量測技術係量測陣列 202 的基態能量，則可判定 A Q S 中不需要感測器。此外，選定的量測技術可判定用於閘極 208、量子點陣列 202 及感測器 212 的製造平面的數目及幾何形狀。亦即，選定的量測技術可規定所需的製造平面的數目(例如，一個、兩個或三個)及平面的幾何形狀(例如，一個平面上的閘極、相同平面或不同平面上的量子點陣列 202，以及相同平面或不同平面上的感測器 212)。例如，若選定的量測技術係量測霍爾效應，則可能需要多個平面。類似地，對於電子傳輸量測，在量子點陣列 202 周圍的特定位置處可能需要一或多個源極引線及一或多個汲極引線連接。

【0077】 另一方面，由將計算問題映射至哈巴德哈密頓算符(參見方程式 1)判定的哈密頓算符可規定量子點及量子點陣列的大小及形狀、陣列 202 中相鄰量子點之間的距離、要施加至 A Q S 200 的磁場、要施加至量子點的失諧(即，哈密頓算符中的電化學項 $\mu_i n_i$)，及 l 或所需點的數目。例如，藉由從具有單個施體原子至具有 100 個施體原子(即，從 1 個 P 施體至約 100 個 P 施體)改變 A Q S 中的量子點的大小，哈巴德哈密頓算符的位點上能量 U 可從 1 meV 至 100 meV 變化。藉由從 5 奈米至 100 奈米改變陣列 202 中的量子點的點間間距 l 幾何形狀，隧道耦合參數 t 可從 0.001 meV 至 10 meV 變化，且位點間能量 V 可從 0.01

meV 至 20 meV 變化。藉由改變多個頻帶上的大約 100 meV 的單粒子能階，可改變哈巴德哈密頓算符的化學電位。另外，藉由在 10 mK 至 50 K 的不同溫度下操作稀釋製冷機，陣列的溫度可從 0.001 meV 至約 4 meV 變化。

【0078】 一旦判定用於 AQS 200 的製造參數，就可基於判定的參數來製造 AQS。

【0079】 應當理解，在一些實施例中，方法 400 由傳統電腦實施。例如，傳統電腦包括儲存用於執行步驟 402 至步驟 406 的指令的記憶體及經組態來執行所儲存指令的處理器。在一些實施例中，傳統電腦經由諸如網際網路的通信網路可通信地耦合至一或多個客戶端裝置。一或多個客戶端裝置的使用者可經由客戶端裝置將諸如模擬或最佳化問題的計算問題提供給遠程電腦。遠程電腦可接收使用者輸入，且基於由使用者選擇的計算問題執行步驟 402 至步驟 406 以判定製造參數以構建 AQS 200 來解決所提供的計算問題。

用於使用製造 AQS 來解決計算問題的示例性方法

【0080】 一旦例如使用方法 400 製造了 AQS 200 來解決計算問題，AQS 200 就可用於解決計算問題。第 5 圖係示出根據本揭露的態樣的用於使用 AQS 的示例性方法 500 的流程圖。方法 500 在步驟 502 開始，在此步驟中設置 AQS 200 且應用選定的量測技術來量測 AQS 的選定性質。

【0081】 在步驟 504 處，解釋量測結果以判定計算問題的解決方案。

【0082】 下表 A 中概述用於從量子點陣列 2 0 2 提取資訊的不同方法。

方法	資訊	問題
基態能量	$E(\langle n \rangle)$	模擬、最佳化
電子傳輸	$\Gamma(\langle n \rangle)$	模擬、最佳化
使用四點探針量測的電壓及/或電容	總體狀態	模擬
電子佔有	n_i	模擬、最佳化

表 A：量測方法、它們相應的資訊、它們適用於什麼問題。

【0083】 例如，基態能量可用作最佳化問題的量測技術，其中僅需要解決方案的成本(例如，在保險風險分析中，造成特定損害的確切情況可能無關緊要，且唯有損壞的成本可為重要的)。在第二實例中，基態能量可用作化學模擬問題的量測技術，其中需要某種物理變量，例如分子的鍵長、基態能量、反應速率。

【0084】 另一方面，電子佔有可用作最佳化問題的量測技術，其中需要解決方案。例如，它可用於旅行商問題，其中需要最佳旅行路線。此外，電子傳輸可用作與有機導體中的能量轉移相關的模擬問題的量測技術。

【0085】 最後，可採用四點探針量測來量測與模擬凝態物質相(諸如超導電性)相關的問題的電壓及/或電容。霍爾效應量測係更一般的四點探針量測的特定實例。

【0086】 基於要從裝置提取的期望特徵，存在不同的方法來判定問題的解決方案。例如，若僅對基態的總能量感興趣，則可量測裝置的傳輸性質以判定總陣列的添加能量。

【0087】 不同的方法可用於各種問題，如表 A 中所概述。最一般的模擬量子計算形式依靠量測量量子點的電荷佔用。

藉由將不同的問題編碼成哈密頓算符，可在量子點陣列上執行不同的量子計算。根據已編碼的問題，對量測結果的解釋可導致不同的資訊。例如，若基態對最佳化問題的解決方案進行編碼，則可判定解決方案的成本不是確切的狀態。這對於不需要確切的解決方案但需要預期風險的某些風險分析可為有用的。

【0088】 第6圖係展示應用於不同模擬量子系統以量測AQS的選定性質的不同量測技術的示意圖。量測方法可限制可模擬的可用陣列結構幾何形狀。特定而言，第6A圖描繪具有1D量子點陣列202的AQS裝置200。此外，展示了源極引線204及汲極引線206。此裝置用於判定陣列202中的量子點的基態能量 $E(n)$ 。在此情況下，將電壓施加至AQS 200的一或多個控制閘極且量測汲極電流。通過量子點陣列的電流可用於判定電子何時載入至陣列上。藉由確保U係最大的交互作用，可將軌道的起點可靠地定義為從0個電子開始。

【0089】 然後可基於施加的電壓及量測的汲極電流讀數來繪製電導峰。藉由調諧閘極電壓且量測電導峰之間的能隙，可估計獲得該電子數解決方案所需的能量。亦即，可估計要解決的問題的解決方案。

【0090】 第6B圖描繪用於量測電子傳輸 $T(n)$ 的AQS裝置(具有1D量子點陣列)。藉由將源極引線204及汲極引線206連接至量子點陣列202中的各個位置，可檢查跨各個量子點位點的傳輸動力學。可在AQS裝置中設計傳輸動力

學，且可使用不同的幾何形狀來檢查不同的性質（優先傳輸等）。例如，藉由將源極及 / 或汲極連接至量子點陣列 202 的發生能量轉移的一部分，可研究電子移動的效率。特定而言，如同第 6A 圖一樣，在此情況下，將電壓施加至 AQS 200 的一或多個控制閘極，且量測汲極電流。然後可基於施加的電壓及量測的汲極電流讀數來繪製電導峰。然後，可藉由量測電導峰的高度來判定計算問題的解決方案，其中更高的峰對應於更好的電子傳輸。

【0091】 第 6C 圖描繪用於量測霍爾效應的 AQS 裝置（具有 2D 量子點陣列）。對於低維材料（諸如 2D 材料），可針對多種應用調諧電導及電子密度。為了研究此類二維材料的性質，可在 AQS 200（具有與低維材料類似的維度）上執行霍爾量測，以闡明各種基本相及臨界相。在一些實例中，四探針量測可用於量測 AQS 的量子點陣列的電壓及 / 或電容。在一些實例中，可實施原子霍爾棒，用於研究基礎物理學以及為廣泛範圍的應用設計 / 模擬新的 2D 材料。藉由改變實驗參數，諸如量子點陣列 202 的溫度及摻雜密度，可量測不同陣列的全相空間。

【0092】 第 6D 圖描繪用於量測 2D 量子點陣列中的每個位點的電子佔有的 AQS 裝置（具有在單獨的平面上製造的 2D 量子點陣列及電荷感測器 212）。此排列可用於獲得計算問題的二元解決方案。藉由同時量測多個電荷感測器 212，有可能對陣列 202 中的不同量子點 100、150 進行三角量測且判定電子何時佔有給定位點。應當理解，這可用於量子

點上具有任何數目個電子的量子點陣列。這可用於執行一般量子計算。此外，藉由使用電荷感測器來校準電子佔有的位置，可判定特定計算的輸出。亦有可能設計3層裝置，其中底層係用於使所有量子點的總體電位偏移的大型電極。然後對量子點進行圖案化，然後是頂部上的電荷感測器層。

【0093】 此係極為強大的，且允許計算最佳化問題以及通用量子計算，只要正確調諧了系統的哈密頓算符。

【0094】 在一些實例中，在可使用AQS 200之前，對其進行初始化。AQS 200的初始化需要在稀釋製冷機中將其冷卻。AQS 200越冷，電荷組態的解析度越好，且因此問題的解決方案的準確度越好。

使用方法400及方法500來模擬SSH模型

【0095】 在先前章節中，概括地解釋了示例性方法400及方法500。為清楚起見，將使用特定實例來解釋方法400及方法500。

【0096】 在一個實例中，計算問題可為模擬蘇-施里弗-海格爾(Su-Schrieffer-Heeger, SSH)模型。SSH模型係拓撲量子系統的最簡單的已知實例中之一者，且描述了沿著具有如第7A圖及第7B圖中示意性所示的交錯隧道耦合 v 及 w 的一維(one-dimensional, 1D)二體化晶格的單電子跳躍。出現二體化一維晶格係因為存在兩個跳躍能 v 、 w 。第7A圖展示在平凡相中的1D量子點陣列700，該量子點陣列包括10個量子點(702及704)，交錯隧道耦合 $v >$

w 。第 7 B 圖展示在拓撲相中的 1 D 量子點陣列 7 1 0，該量子點陣列由 1 0 個量子點 (7 0 2 及 7 0 4) 組成。在拓撲非平凡相中，交錯隧道耦合呈 $v < w$ 的形式。

【0097】 在方法 4 0 0 的步驟 4 0 2 處，識別量測方法。SSH 模型的本征能量產生兩個不同的相：拓撲平凡相 (第 7 A 圖)，其中系統係塊狀絕緣體 (且 $v > w$)；以及拓撲非平凡相 (第 7 B 圖) (其中 $v < w$)，該拓撲非平凡相產生兩個零能量邊緣態，其中電子局限於 1 D 晶格的兩個邊界處。因此，可容易地得出結論：用於模擬 SSH 模型的計算問題的適當量測方法中之一者係量測基態能量。此外，由於 SSH 模型的 1 D 性質，可得出結論：四探針量測或霍爾效應將不是用於此問題的期望量測方法。

【0098】 接下來，在步驟 4 0 4 處，可將模擬 SSH 模型的計算問題映射至方程式 1 的一般哈巴德哈密頓算符。在一些實例中，SSH 模型可為非交互作用模型，其中位點內及位點間電子交互作用能都可設定為零，且化學電位亦設定為零。在其他實例中，SSH 模型可為交互作用的且具有非零庫侖電位及 / 或化學電位。SSH 模型需要電子跳躍項具有交替的強度，以便觀察拓撲相，同時對於用於偏壓光譜術的可量測傳輸電流而言足夠大。

【0099】 因此，在將交互作用的 SSH 模型映射至哈巴德哈密頓算符時產生的最終哈密頓算符由下式給出：

$$H_{SSH} = \sum_i U_i n_i (n_i - 1) - \sum_i \mu_i n_i + \sum_{i < j} V_{ij} n_i n_j + \sum_{n=1}^N v_n c_{n,1}^\dagger c_{n,2} + w_n c_{n,2}^\dagger c_{n+1,1} + hc \quad (7)$$

【0100】 其中 $v_n = v$, $\forall n$ 且 $w_n = w$, $\forall n$ 。

【0101】 接下來，在方法的步驟 406 處，基於量測方法及經映射的哈密頓算符來識別裝置製造參數。因為期望量測拓撲平凡狀態及拓撲非平凡狀態的基態能量，所以將需要兩個 AQS 裝置來模擬 SSH 模型。

【0102】 如上所述，已識別的量測方法為 1) 基態能量量測及 2) SSH 模型的電子傳輸。因而，需要源極引線及汲極引線來量測跨量子點陣列的電流，且不需要電荷感測器。

【0103】 基於判定的 SSH 哈密頓算符，出於對稱目的，需要偶數個量子點。十個量子點處於用傳統方式能夠模擬的極限。因此，選擇 10 個量子點，以便將理論結果與量測結果進行比較。量子點陣列的幾何形狀由 SSH 哈密頓算符的要求判定，以沿著 1D 鏈（例如，類似於第 3 圖所示的開放量子點陣列 302）具有交替的隧道交互作用強度。在此實例中，執行靜電建模以判定能夠控制量子點陣列的閘極的最小數目。因此，判定需要至少六個閘極，且此等閘極可與量子點陣列放置於平面內。

【0104】 判定點間間距，使得可量測電流可被量測，但是足夠小以使得點係獨立的（ v, w 約 $1 \text{ meV} < U$ 約 25 meV ）。

【0105】 在執行方法 400 之後，使用已識別的裝置製造參數來製造兩個 AQS 裝置，參見第 8A 圖及第 8B 圖。製造裝置 I 以對拓撲平凡相進行建模，且製造裝置 II 以對拓撲非平凡狀態進行建模。裝置 I 及裝置 II 都是示例性 AQS。在第 8A 圖及第 8B 圖所示的裝置中，量子點陣列 802 隧道耦合至

源極引線 804 及汲極引線 806，以便經由陣列 802 執行偏壓光譜術。輪廓為橙色及藍色的區域表示 SSH 模型的不同子晶格中的量子點。隧道耦合 $t_{i,i+1}$ 係經由點間施體間距 $d_{i,i+1}$ 設計的，且遵循逆指數相依性 $t_{i,i+1} \propto \exp\left(-\frac{2d_{i,i+1}}{3}\right)$ 。

【0106】 非最近鄰穿隧受到指數抑制，估計 $t_{i,i+2}/t_{i,i+1} \approx 0.01$ ，從而確保電子傳輸通過鏈連續發生。SSH 模型需要隧道耦合係交替強度的，以觀察不同的拓撲相，同時足夠大以允許用於偏壓光譜術的可量測傳輸電流。量子點大小係關鍵的，因為外層電子經歷的局限電位且因此相鄰量子點的波函數重疊取決於包括量子點的施體的數目。因而，為了達成均勻交錯的 v 及 w ，點間間距及量子點大小必須設計成具有奈米精度。量子點製造成具有約 25 nm^2 的面積（每個位點約 25 個 P 施體），相隔 7 nm 至 11 nm ($t \approx 1 \text{ meV}$ 至 10 meV)，其中施體數的微小差異不會顯著改變 t 、 U 或 v 。第 8A 圖中所示的示例性裝置設計成處於平凡組態，平均交錯量子點距離 $d_v = 7.7 \pm 0.1 \text{ nm}$ 且 $d_w = 10.1 \pm 0.2 \text{ nm}$ （對應於 $\langle v/w \rangle = 2.08$ ）。在第 8B 圖所示的示例性裝置中，裝置設計成處於拓撲非平凡相，平均交錯施體距離 $d_v = 9.6 \pm 0.4 \text{ nm}$ 且 $d_w = 7.8 \pm 0.6 \text{ nm}$ （對應於 $\langle v/w \rangle = 0.265$ ）。

【0107】 SSH 鏈需要交替的最近鄰隧道耦合，此係經由點間施體間距設計的，且遵循指數相依性。除了交替的隧道耦合之外，點間施體間距亦需要足夠近，使得在低 SD 偏壓下有足夠的傳輸電流通過裝置，使得我們可量測通過鏈的

電流，同時施體點亦需要足夠遠，以便防止施體點之間的隧道耦合及電容耦合太大，使得該等點彼此獨立地表現。

【0108】 因為本揭露中的裝置的施體點大小局限於約 $6 \leq d_i \leq 12 \text{ nm}$ 的施體點間距。在此範圍內，施體點間隔足夠遠，使得它們獨立地表現，足夠近以使得可通過裝置量測到足夠的電流，同時由於指數相依性，允許交替的隧道耦合之間的比率足夠大，以在SSH模型的平凡狀態及拓撲狀態內足夠遠。

【0109】 裝置中的量子點 (quantum dot, QD) 大小 $\approx 25 \text{ nm}^2$ ，每個位點容納 ≈ 25 個P施體。選擇此等大小係因為它們允許均勻的量子點，均勻的量子點能穩健地抵抗幾個P施體中的變化，而對於幾個P施體的小量子點大小，單個P數目的變化導致不均勻性且 U_i 及 V_{ij} 的變化較大。相反，對於大的量子點，點之間的電容耦合變得太大，從而導致點不能獨立地表現，在此情況下，需要增加點之間間距來適應此情況。在此實例中，位點上庫侖能量係 $U \approx 25 \text{ meV}$ ，且位點間庫侖能量係 $V < 5 \text{ meV}$ 。且溫度係 $T \approx 100 \text{ mK}$ 。

【0110】 為了能夠調諧鏈中的量子點的化學電位，需要電容耦合至量子點的控制閘極。為了獨立地調諧每個量子點的化學電位，使得可存取跨10個點鏈的所有可能的能階組合，將需要至少10個控制閘極。然而，為了實現跨鏈的SSH模型，此係不必要的，因為僅需要能夠在零源極/汲極偏壓下使化學電位發生諧振。

【0111】 由於經由量子點大小及間距判定的鏈大小的實體限制，將10個控制閘極裝配於裝置中，同時仍然使閘極相隔足夠遠以允許在擊穿洩漏發生之前有合理的操作閘極範圍係不可行的。此外，若閘極同等地電容耦合至相同量子點，則更多的閘極未必允許在調諧單個點的化學電位時進行更獨立的控制。更重要的係在量子點至閘極之間有足夠的差動杠桿臂。其中差動杠桿臂係指改變量子點相對於彼此的電化學電位的能力。絕對杠桿臂係指一起調諧量子點的電化學電位的能力。

【0112】 為了最大化絕對杠桿臂及差動杠桿臂，考慮10點鏈及閘極的佈局。第8C圖展示鏈的一區段的示意圖，其中點分別處於線性、直角及傾斜排列。線性排列導致最低的差動杠桿臂，且大大減少了點的獨立控制。為了對此進行改良，可將點排列成傾斜的陣列，而最大的控制發生在點以直角排列時。然而，在直角排列中，點之間的次近鄰距離減小，從而導致次近鄰隧道耦合與最近鄰隧道耦合相當。這允許並行穿隧通過點，這在SSH模型中係不允許的，SSH模型需要依序穿隧通過鏈。

【0113】 因而，為了防止並行穿隧通過鏈，同時仍然最大化差動杠桿臂，將點排列成具有 120° 角的傾斜陣列。在此排列中，次近鄰穿隧受到指數抑制，估計 $t_{i,i+2}/t_{i,i+1} \approx 0.01$ ，從而確保電子傳輸通過鏈依序發生。

【0114】 一旦例如使用方法 400 製造了 AQS 200 來模擬 SSH 模型，AQS 200 就可用於使用方法 500 來模擬計算問題。

【0115】 在步驟 502 處，將電流施加至已製造的裝置 I 以量測電導，此處來自步驟 402 的已識別的量測方法係量測基態。類似地，將電流施加至裝置 II 以量測電導。

【0116】 第 9 A 圖展示完整裝置 I 的 STM 影像。此處，輪廓更亮的區域展示具有 6 個電容耦合的控制閘極 (G1 至 G6) 的微影氬遮罩，這對於獨立控制量子點裝置 II 的電化學電位至關重要，在閘極數方面基本相似。由於裝置的獨特幾何形狀，一起鏈接至每個量子點的所有閘極的總杠杆臂被設計成一致的，變化 $< 2.5\%$ 。這種小的變化意調整個量子點陣列的總體電化學電位可升高以便偏壓光譜術量測 SSH 模型的不同相。為了對準量子點的電化學電位，使用最大電流對準方案，其中如第 9 B 圖中所概述來調諧各個閘極。

【0117】 此係藉由以下來達成：最初將閘極電壓設定在藉由相對於 G4、G5 及 G6 掃描 G1、G2 及 G3 來判定的電導峰，同時量測通過陣列的電流。如第 9 C 圖所示出，當定位在此電導峰處時，每個閘極然後在設定值周圍單獨掃描，而所有其他閘極保持恆定。

【0118】 在掃描所有六個閘極的設定電壓之後，找到最大電流峰值，且將對應的閘極更新為電流峰值中心處的電壓 (第 9 D 圖所示的第一次反覆中的 G5)。然後再次掃描所有閘極，重複此過程，每次更新單個閘極，如第 9 D 圖所示。

【0119】 第9E圖展示針對恆定源極/汲極偏壓 V_{SD} 的每次反覆在每次閘極掃描上量測的最大電流。當最大電流平穩時，進一步降低 V_{SD} ，且重複整個過程以提高對準的準確度。

【0120】 一旦對準了量子點的電化學電位，我們就藉由使所有量子點的電化學電位偏移來執行穩定圖量測，以研究陣列的電子佔有。穩定圖允許我們判定依量子點的電化學電位而變的陣列的電子佔有。在零源極-汲極偏壓下(第9B圖中的白色虛線)，每次僅有足夠的能量將單個電子添加至陣列。在此狀態下，模擬了SSH模型。

【0121】 接下來，在步驟504處，解釋(分析)量測資料——電導峰，以判定SSH模型的解決方案。

【0122】 第10圖展示裝置I及裝置II的實驗結果及理論結果的比較。

【0123】 第10A圖展示依陣列的隧道耦合比(v/w)而變的計算出的正規化零偏壓電導。平凡相中的裝置I的設計由紅色虛線($\langle v/w \rangle = 2.08$)給出，而拓撲相中的裝置II由藍色虛線($\langle v/w \rangle = 0.265$)給出。

【0124】 第10B圖展示依從平凡相(裝置I)獲得的所有閘極上的組合電壓而變的零偏壓電導，其中理論計算展示為紅色。存在十個電導峰，它們對應於陣列上的電子總數的變化，參見第10C圖。藉由調整閘極電壓來控制陣列的電子填充，以從 m 至 $m + 10$ (半填充)調整電子數。在四分之一填充($m + 5$)時，能譜中存在間隙 7.9 meV ，它對應於平凡相的SSH模型的單基態。

【0125】 根據由靜電建模對 $V_{i,j}$ 的估計，且擬合隧道耦合的量值，我們對陣列建模以獲得不同電子數區域的寬度 $S_k(m + k \rightarrow m + k + 1)$ 區域的寬度)。第 10 D 圖展示藉由判定相鄰電導峰之間的能量獲得的實驗量測穩定區域的寬度，與基於隧道耦合比 $\langle v/w \rangle = 2.08$ 的靜電建模進行的理論計算進行比較。發現實驗值與理論值之間的一致性極好。小的差異 ($< 1 \text{ meV}$) 很可能係由於量子點電化學電位的小的對準偏差，這引起位點上無序，導致電導峰中小的偏移，使得峰結構不再圍繞零對稱。

【0126】 第 10 E 圖展示裝置 II 的 SSH 模型的拓撲相。第 10 E 圖中的藍線表示理論與實驗的擬合，其中隧道耦合比 $\langle v/w \rangle = 0.265$ 。與裝置 I 類似的電壓範圍掃描，但是此處可觀察到，在零閘極電壓及 85.5 mV 處的兩組緊密間隔的峰值，它們對應於跨陣列的平均位點上能量， $\langle U \rangle = 22.0 \pm 3.2 \text{ meV}$ 。來自遠離四分之一填充的狀態的電導峰不可見，因為它們現在在陣列的主體內離開原位，在邊緣量子點處存在的概率低。因此，此等類體狀態及源極 / 汲極引線之間的穿隧得到顯著抑制。在拓撲相中，四分之一填充間隙幾乎完全消失，從 $m + 4$ 至 $m + 6$ 狀態的急劇轉變僅由第 10 F 圖所示的兩個相隔約 0.2 meV 的電導峰給出。此等電子狀態對應於邊緣量子點上沒有電子 ($m + 4$ 個電子) 的情況至兩個點都被佔有 ($m + 6$ 個電子) 的情況。重要的是，在精確的四分之一填充 ($m + 5$ 個電子) 時，由於近四倍簡並基態，在陣列上同時存在 4 個 ($P \approx 0.05$)，(P

≈ 0.30 或 ≈ 0.60 ，由於兩倍簡並)或6個($P \approx 0.05$)電子的概率為非零，如第10G圖所示出。

【0127】 這種顯著的觀察結果(即，在零閘極偏壓下，在邊緣量子點上存在電子數的疊加)係陣列拓撲狀態的近零能量的直接結果，且係多體SSH模型的獨特性質。因為此等拓撲狀態局限於邊緣量子點，所以流過陣列的電流對應於電子從陣列的一側移動至另一側，而不佔有內部量子點中之任一者。這種獨特的性質係嵌入於SSH模型內的拓撲結構的直接結果，如第9E圖中的雙電導峰所證實。

使用方法400及方法500來模擬電池中的平衡電壓

【0128】 在本章節中，將關於模擬界面的實例來解釋方法400及方法500。在此實施例中，待解決的計算問題與模擬一或多個界面的行為有關。

【0129】 界面係兩個系統之間形成的區域。特定而言，在兩種不同的晶體結構或相之間。瞭解界面的行為在許多材料科學問題中係重要的。當前用於模擬界面的方法使用密度泛函理論(density functional theory, DFT)。此類方法通常必須在高計算成本及簡化近似之間取得平衡。本揭露的態樣藉由允許經由製造AQS直接模擬特定界面來克服此等缺點。

【0130】 具有界面的AQS由至少兩種不同的量子點結構組成。第11圖的左側面板展示兩個系統(1110、1120、1130及1140)之間的四個不同界面。在此實例中，兩個系

統係兩個不同的量子點陣列結構。這兩個量子點陣列由淺色陰影區域及深色陰影區域或者陣列1及陣列2表示。

【0131】 在系統1110中，並排存在兩個不同的量子點陣列。存在一個界面——它在兩個陣列之間形成線。此界面由虛線框1112突出顯示。在系統1120中，同樣存在兩個不同的量子點陣列——一個矩形嵌套在另一個矩形內。存在一個界面——它在兩個陣列之間形成矩形。此界面由虛線框1122突出顯示。系統1130及系統1140展示兩個量子點陣列系統的不同排列的示例性界面。在每種情況下，界面分別由虛線矩形1132及虛線矩形1142突出顯示。

【0132】 第11圖的右側面板展示界面1112、1122、1132、1142的放大視圖。在一個實例中，界面可具有無無序1150。在此情況下，兩種系統之間存在清晰的分界。在此實例中，陣列1的量子點由較大的圓圈表示，且陣列2的量子點由較小的圓圈表示。在具有無無序界面的系統中，陣列1在左側，包括第一複數個量子點，且陣列2在右側，包括第二複數個量子點，且兩個陣列之間不存在混合。

【0133】 在一個實例中，兩個量子點陣列之間的差異可為量子點的大小。在其他實例中，兩個量子點陣列之間的差異可為陣列結構，例如，陣列1為方形晶格，且陣列2為三角形晶格。應當理解，陣列可由量子點大小、形狀及數目、點間間距及晶格幾何形狀的任意組合形成。

【0134】 另一種類型的界面為原子無序界面 1160。在此實例中，陣列 1 與陣列 2 之間的界面可能無法清晰可分。相反，界面包括陣列 1 的量子點及陣列 2 的量子點的隨機混合物。

【0135】 又一種類型的界面為包括連續無序 1170 的界面。在此實例中，陣列 1 以連續方式合併至陣列 2 中。例如，陣列 1 可為包括方形晶格上的 4 P 量子點的陣列，且陣列 2 可包括 1 P 量子點的方形陣列。因而，界面包括方形晶格上的 2 P 及 3 P 量子點。

【0136】 應當理解，界面的無序可經由 A Q S 的製造過程精確地控制。

【0137】 應當理解，第 11 圖示出兩個量子點陣列之間的示例性界面。然而，這可擴展為包括具有 M 個系統及至少 M + 1 個界面的裝置。

【0138】 方法 400 可用於判定用於 A Q S 的製造參數以模擬界面。

【0139】 在方法 400 的步驟 402 處，識別量測方法。在模擬界面的情況下，獲得解決方案所需的量測方法可使用基於四點探針量測的方法 3 (見表 A) 獲得。例如使用霍爾棒幾何形狀。霍爾棒幾何形狀允許直接量測非常大的量子點陣列的界面的電壓及 / 或電容。此等量測對於電子元件的界面的許多重要材料性質係有用的。

【0140】 接下來，在步驟 404 處，將模擬一或多個界面的計算問題映射至方程式 1 的一般哈巴德哈密頓算符。特定而

言，可將每個量子點陣列映射至方程式 1 的哈巴德哈密頓算符以得出對應於每個量子點陣列的經映射的哈密頓算符。

【0141】 接下來，在方法的步驟 406 處，基於量測方法及經映射的哈密頓算符來識別裝置製造參數。

【0142】 由於霍爾棒量測（四點探針量測的特定實例）被識別為量測方法，因此至少需要一個源極引線及至少一個汲極引線。此外，為了量測界面上的電壓降，每個量子點陣列需要至少兩個閘電極。量子點陣列參數取決於對應於量子點陣列的經映射的哈密頓算符。

【0143】 在執行方法 400 之後，可使用已識別的裝置製造參數來製造 AQS 200。

【0144】 一旦製造了 AQS 200，AQS 200 就可用於使用方法 500 來模擬計算問題。

【0145】 在一個實施例中，模擬界面的問題可與模擬電池中的電極之間的電壓有關。在技術驅動的現代世界中，電池使用量不斷增加，諸如電動車、智慧型手機、膝上型電腦等行動系統全都依靠儲存的能量來操作。因而，需要生產可持續更長時間、儲存更多能量且具有製造成本效益的改良電池。為了達成這一點，重要的是能夠準確地對不同的電池進行建模以便最佳化效能。

【0146】 方法 400 可用於製造用於模擬電池以判定平衡電壓的 AQS。例如，可製造 AQS 來模擬鋰離子電池中的電極。在此實例中，量測方法係四點探針量測，例如霍爾效應（步驟 402）。

【0147】 接下來，在步驟 404 處，基於模擬電池的計算問題產生哈密頓算符。可使用方程式 1 的哈巴德模型來描述 (2D) 晶體能量，藉由明智地選擇交互作用及跳躍幅度在 AQS 中直接模擬該哈巴德模型。此係藉由獲得晶體哈密頓算符 (化學哈密頓算符) 且將其映射至低能 (哈巴德) 哈密頓算符 (參見方程式 1) 以進行模擬來執行的。然後可模擬系統的總體相，即總體凝態物質相，例如超導體、金屬等。此方法大大降低了判定晶體能量的計算複雜性。

【0148】 接下來，在步驟 406 處，基於使用霍爾效應量測及經映射的哈密頓算符來識別裝置製造參數。

【0149】 第 12A 圖展示用於模擬兩個量子點陣列 1210 及 1220 之間的界面的示例性 AQS。兩個量子點陣列之間的界面由 1230 表示。例如，2D 陣列 1210 可表示陰極且 2D 陣列 1220 表示電池的陽極。電池的電化學行為可經由四點探針量測直接模擬——例如在霍爾棒幾何結構中使用 4 點量測——參見第 12A 圖。藉由將電壓 (霍爾) 探針定位在陰極 1210 與陽極 1220 之間的界面 1230 的任一側，可直接量測它們之間的電壓差。

【0150】 界面 1230 上的電壓降係對由電化學電池產生的平衡電壓 (V_{eq}) 的直接量測。可改變陣列中的摻雜以檢查電位如何依據電荷密度而變化。這可用於推斷關於隨時間流逝的電池效能的資訊。為了改變摻雜濃度，可改變在陣列的頂部的閘極以改變電子佔有。

【0151】 由電化學電池產生的平衡電壓 V_{eq} 可使用能斯特方程式 $V_{eq} = -\Delta G / nF$ 找到，其中 ΔG 係自由能隨著電化學電池中存在的反應而發生的變化， n 係反應中轉移的電荷數，且 F 係法拉第常數。在某些條件下（例如，低溫、完全放電 / 充電循環平均值），該方程式可簡化為，

$$V_{eq} = -\frac{[E_{Reactants} - E_{Products}]}{nF}。$$

例如，以 $LiCoO_2$ 為陰極，且金屬 Li 為陽極，發現平衡電壓為：

$$V_{eq} = -\frac{[E_{LiCoO_2} - E_{CoO_2} - E_{Li}]}{F}。$$

【0152】 這最終需要判定存在及不存在鋰離子的情況下 $LiCoO_2$ 晶體的能量。此等能量傳統上係使用 DFT 發現的，需要大量資源且缺乏足夠的準確度。

【0153】 此外，亦可利用對陰極 1210 與陽極 1220 之間的界面 1230 的原子級控制來檢查無序對平衡電壓的影響。在界面 1230 處，可添加有意的缺陷以判定材料的界面對電池產生的電壓有多重要——參見 1160、1170 例如無序。

【0154】 一旦完成了方法 400，就可製造適於模擬電池的 AQS。

【0155】 接下來，示例性方法 500 可用於使用 AQS 來模擬電池。

【0156】 在步驟 502 處，應用選定的量測方法以量測 AQS 的選定的性質。量測界面 1230 上的電壓降 1240 將係對 V_{eq}

的直接量測。例如，這種模擬利用電子而不是鋰離子作為電荷載子的傳輸。

【0157】 可藉由經由源極引線及汲極引線施加電流並監測界面的每一側上的閘極中之每一者上的電壓來執行量測。藉由觀察閘極之間的電位差，可直接量測 V_{eq} 。

【0158】 接下來，在步驟 504 處，解釋(分析)量測資料(平衡電壓)以判定界面問題的解決方案。第 12B 圖展示依閘極電壓而變的平衡電壓資料的曲線圖。這種方法允許直接模擬 V_{eq} ，這對於針對所有類型的電池設計新的陰極及陽極材料係重要的。可使用此值的準確計算，而不是實際上製造不同的材料(這將需要對單個陰極進行廣泛的研究及開發)。此計算基本上係量子化學計算(量子計算的主要應用中之一者)，其中可直接判定感興趣的變量 V_{eq} 。

【0159】 閘極電壓可用於控制陰極 1210 及陽極 1220 的每一側的摻雜以模擬反應動力學。藉由減少陽極 1220 中的電荷載子(電子，類似於電化學電池的陰極 1210 中的鋰離子)，可模擬電池的耗盡以判定電池放電循環期間平衡電壓如何變化——參見第 12B 圖。

【0160】 應當理解，藉由執行電容量測，可使用類似的方法來檢查超級電容器中的電容。然而，哈密頓算符及晶格結構需要有所不同，以反映超級電容器的不同幾何形狀。根據正在研究的超級電容器的確切機制，這種幾何形狀可能不同。可藉由調諧閘極電壓以將更多電子添加至晶格以建立靜電荷來執行電容器的充電。

【符號說明】

【0161】

1 0 0 , 1 5 0 : 量 子 點

1 0 2 : 半 導 體 基 板

1 0 4 : 介 電 質

1 0 6 : 界 面

1 0 8 : 施 體 原 子

1 1 0 : 電 子

1 1 2 , 1 1 4 , 1 5 2 : 閘 極

1 1 6 : 波 函 數

2 0 0 : A Q S

2 0 2 : 量 子 點 陣 列

2 0 4 : 源 極

2 0 6 : 汲 極

2 0 8 : 控 制 閘 極

2 1 2 : 感 測 器

3 0 2 : 開 放 量 子 點 陣 列

3 0 4 : 1 D 封 閉 陣 列

3 0 6 : 2 D 六 邊 形 陣 列

3 0 8 : 2 D 矩 形 陣 列

3 1 0 : 2 D 傾 斜 陣 列

3 1 2 : 結 構

4 0 0 , 5 0 0 : 方 法

4 0 2 , 4 0 4 , 4 0 6 , 5 0 2 , 5 0 4 : 步 驟

7 0 0 , 7 1 0 : 1 D 量 子 點 陣 列

7 0 2 , 7 0 4 : 量 子 點

8 0 2 : 量 子 點 陣 列

8 0 4 : 源 極 引 線

8 0 6 : 汲 極 引 線

1 1 1 0 , 1 1 2 0 , 1 1 3 0 , 1 1 4 0 : 系 統

1 1 5 0 : 無 無 序

1 1 6 0 : 原 子 無 序 界 面

1 1 7 0 : 連 續 無 序

1 1 1 2 , 1 1 2 2 , 1 1 3 2 , 1 1 4 2 : 界 面

1 2 1 0 : 陰 極

1 2 2 0 : 陽 極

1 2 3 0 : 界 面

1 2 4 0 : 電 壓 降

【生物材料寄存】

國 內 寄 存 資 訊 (請 依 寄 存 機 構 、 日 期 、 號 碼 順 序 註 記)

無

國 外 寄 存 資 訊 (請 依 寄 存 國 家 、 機 構 、 日 期 、 號 碼 順 序 註 記)

無

【發明申請專利範圍】

【請求項 1】 一種用於製造一模擬量子系統的方法，該方法包括以下步驟：

基於一計算問題產生一哈密頓算符，關於該計算問題，使用一或多種已識別的量測方法尋求一解決方案；

基於該一或多種已識別的量測方法及該哈密頓算符識別用於該模擬量子系統的模擬量子系統製造參數；以及

基於該等已識別的模擬量子系統製造參數來製造該模擬量子系統。

【請求項 2】 如請求項 1 所述之方法，其中該方法進一步包括以下步驟：識別用於獲得該計算問題的該解決方案的該一或多種量測方法。

【請求項 3】 如請求項 1 或 2 所述之方法，其中該一或多種量測方法選自包括以下各項中之至少一者的一列表：

量測該模擬量子系統的一量子點陣列的基態能量；

量測該模擬量子系統的源極引線與汲極引線之間的電子傳輸概率；

使用四點探針量測來量測該模擬量子系統的該量子點陣列上的一電壓及/或電容；以及

量測該模擬量子系統的一量子點陣列的一或多個量子點中的電子佔有。

【請求項 4】 如請求項 1 至 3 中任一項所述之方法，其中該等系統製造參數包括以下各項中之至少一者：

該模擬量子系統的控制閘極的數目；

該模擬量子系統的源極引線的數目；

該模擬量子系統的汲極引線的數目；

該模擬量子系統的電荷感測器的數目；

該模擬量子系統的維度；

該模擬量子系統的該量子點陣列中的該等量子點的數目及/或幾何形狀；

該模擬量子系統的該量子點陣列中的相鄰量子點之間的間距；

該模擬量子系統的溫度；以及

該模擬量子系統的失諧。

【請求項5】 一種用於製造一用於模擬一電池的模擬量子系統的方法，該方法包括以下步驟：

基於模擬該電池的計算問題產生一哈密頓算符；

基於該哈密頓算符識別用於該模擬量子系統的系統製造參數且使用四點探針量測來量測一第一量子點陣列與一第二量子點陣列之間的一電壓及/或電容；以及

基於該等已識別的系統製造參數來製造該模擬量子系統。

【請求項6】 如請求項5所述之方法，其中該等系統製造參數包括以下各項中之至少一者：

該模擬量子系統的控制閘極的數目；

該模擬量子系統的源極引線的數目；

該模擬量子系統的汲極引線的數目；

該模擬量子系統的電荷感測器的數目；

該模擬量子系統的該第一量子點陣列及該第二量子點陣列的維度；

該第一量子點陣列及該第二量子點陣列中的量子點的數目及/或幾何形狀；

該第一量子點陣列及該第二量子點陣列中的相鄰量子點之間的間距；

該模擬量子系統的溫度；以及

該模擬量子系統的失諧。

【請求項 7】 一種用於製造一用於模擬至少一個界面的模擬量子系統的方法，該方法包括以下步驟：

基於模擬一界面的計算問題產生一哈密頓算符；

基於該哈密頓算符識別用於該模擬量子系統的系統製造參數且使用四點探針量測來量測一第一量子點陣列與一第二量子點陣列之間的至少一個界面之間的一電壓及/或電容；以及

基於該等已識別的系統製造參數來製造該模擬量子系統。

【請求項 8】 如請求項 7 所述之方法，其中該等系統製造參數包括以下各項中之至少一者：

該模擬量子系統的控制閘極的數目；

該模擬量子系統的源極引線的數目；

該模擬量子系統的汲極引線的數目；

該模擬量子系統的電荷感測器的數目；

該模擬量子系統的至少兩個量子點陣列的維度；

該至少兩個量子點陣列中的量子點的數目及/或幾何形狀；

該至少兩個量子點陣列中的相鄰量子點之間的間距；

該模擬量子系統的溫度；以及

該模擬量子系統的失諧。

【請求項 9】 如請求項 1 至 8 中任一項所述之方法，其中製造該模擬量子系統包括：

製備一半導體基板的一主體層；

將該半導體層的乾淨晶體表面曝露於摻雜劑分子以在該曝露表面上產生一摻雜劑點陣列；

將該陣列狀表面退火以將該等摻雜劑點併入至該半導體層中；以及

形成一或多個控制閘極、源極引線及汲極引線。

【請求項 10】 如請求項 9 所述之方法，其中該一或多個控制閘極形成於與該等摻雜劑點相同的一平面中。

【請求項 11】 如請求項 9 所述之方法，其進一步包括在經退火的第二半導體層上方沉積一介電材料，其中該一或多個控制閘極形成於該介電材料上方。

【請求項 12】 如請求項 9 所述之方法，其進一步包括在該模擬量子系統中形成一或多個電荷感測器以感測該一或多個摻雜劑點的電荷。

【請求項 13】 一種用於解決一計算問題的方法，該方法包括以下步驟：

提供一模擬量子系統，該模擬量子系統包括：

一量子點陣列，該量子點陣列模擬一費米哈巴德模型，

複數個控制閘極，該複數個控制閘極用於改變哈巴德哈密頓算符參數，以及

一或多個源極引線及汲極引線，該一或多個源極引線及汲極引線用於量測通過該量子點陣列的電流；

應用一選定的量測方法來量測該模擬量子系統的一或多個性質；以及

解釋該模擬量子系統的所量測的該一或多個性質以判定該計算問題的一解決方案。

【請求項 14】如請求項 13 所述之方法，其中該計算問題係一模擬問題或一最佳化問題。

【請求項 15】如請求項 13 所述之方法，其中該選定的量測方法係以下各項中之至少一者：

量測該模擬量子系統的一量子點陣列的基態能量；

量測該模擬量子系統的源極引線與汲極引線之間的電子傳輸概率；

使用四點探針量測來量測該模擬量子系統的該量子點陣列上的一電壓及/或電容；或者

量測該模擬量子系統的該量子點陣列的一或多個量子點中的電子佔有。

【請求項 16】如請求項 15 所述之方法，其中量測該量子點陣列的基態能量包括識別相鄰所量測電導峰之間的一能隙。

【請求項 17】如請求項 15 所述之方法，其中量測該電子傳輸概率包括識別所量測電導峰的高度。

【請求項 18】一種用於解決模擬一電池的一計算問題的方法，該方法包括以下步驟：

提供一模擬量子系統，該模擬量子系統包括：

至少兩個量子點陣列，該至少兩個量子點陣列模擬一費米哈巴德模型，

複數個控制閘極，該複數個控制閘極用於改變哈巴德哈密頓算符參數，以及

一或多個源極引線及汲極引線，該一或多個源極引線及汲極引線用於量測通過該陣列的電流；

使用四點探針量測來量測第一量子點陣列與第二量子點陣列之間的一電壓及/或電容；以及

解釋該模擬量子系統的該所量測電壓及/或電容以判定該計算問題的一解決方案。

【請求項 19】一種用於解決模擬至少一個界面的一計算問題的方法，該方法包括以下步驟：

提供一模擬量子系統，該模擬量子系統包括：

至少兩個量子點陣列，該至少兩個量子點陣列模擬一費米哈巴德模型，

一界面，該界面界定於該至少兩個量子點陣列之間；

複數個控制閘極，該複數個控制閘極用於改變哈巴德哈密頓算符參數，以及

一或多個源極引線及汲極引線，該一或多個源極引線及汲極引線用於量測通過該至少兩個量子點陣列的電流；

應用四點探針量測來量測該界面上的一電壓及/或電容；以及

解釋該模擬量子系統的該所量測電壓及/或電容以判定模擬至少一個界面的該計算問題的一解決方案。

【請求項 20】如請求項 13、18 或 19 中任一項所述之方法，其中該複數個控制閘極改變量子點的電化學電位及/或該等量子點之間的隧道耦合。

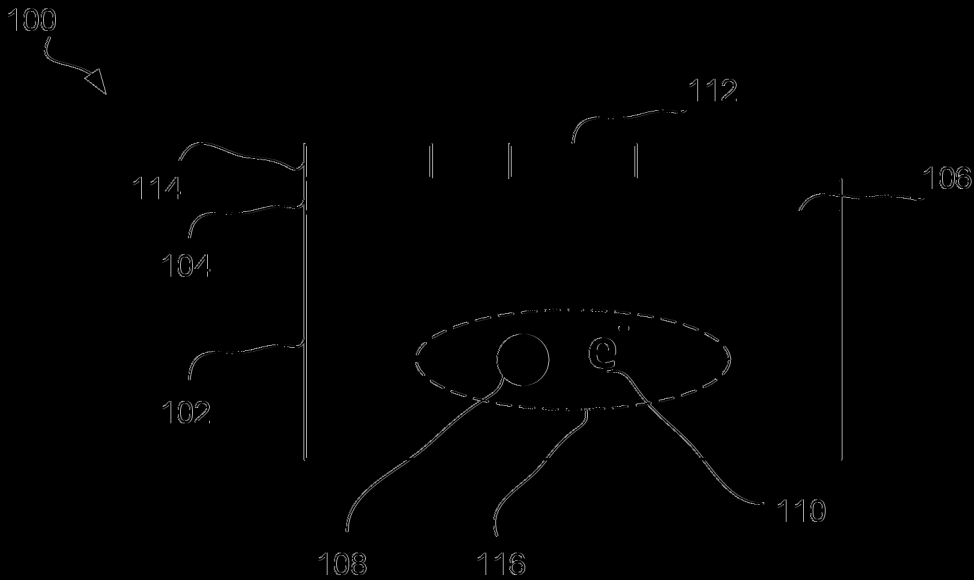
【請求項 21】如請求項 13 至 20 中任一項所述之方法，其中該模擬量子系統包括至少一個電荷感測器，該至少一個電荷感測器用於量測該陣列的一或多個量子點中的電子佔有。

【請求項 22】如請求項 13 至 20 任一項所述之方法，其中該等量子點為施體摻雜的矽量子點。

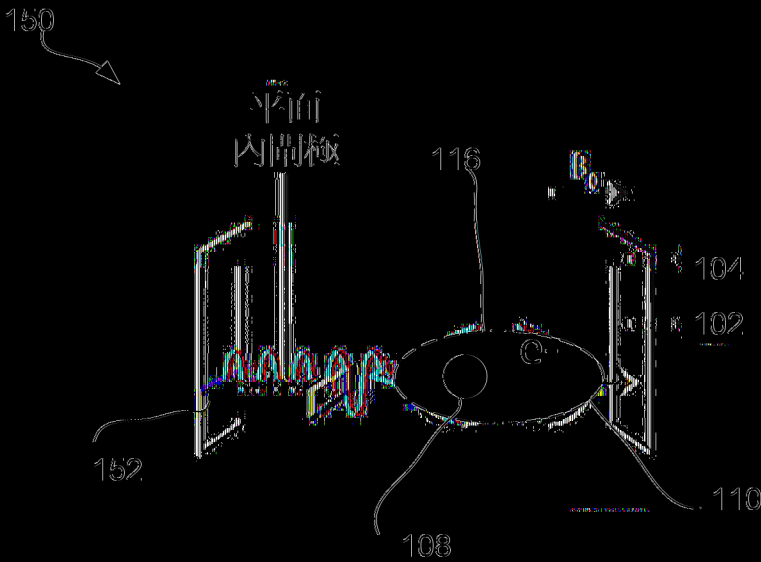
【請求項 23】如請求項 13 至 20 中任一項所述之方法，其中該陣列係使用掃描穿隧顯微術製造的。

【請求項 24】如請求項 13 至 20 中任一項所述之方法，其中該陣列為一維、二維或三維的。

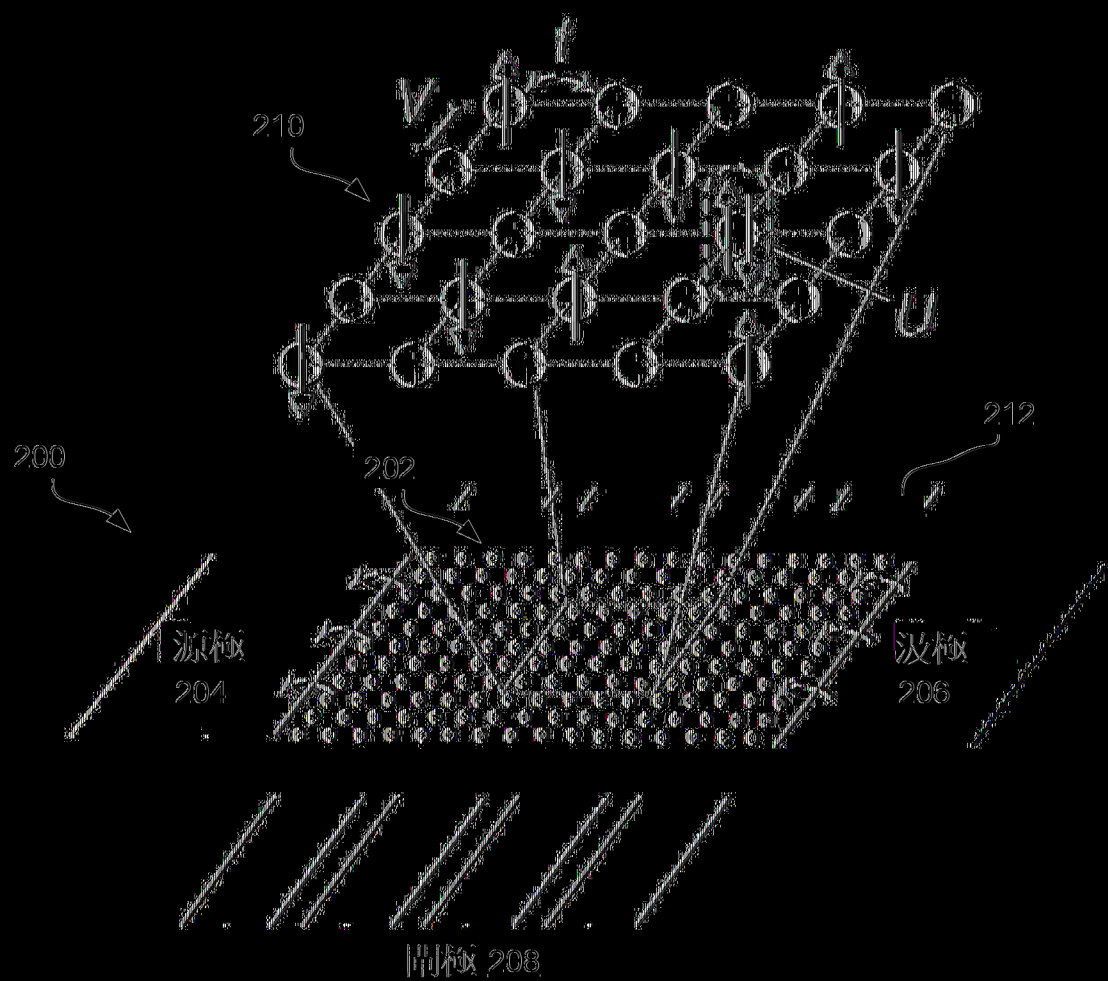
【請求項 25】一種模擬量子系統，該模擬量子系統係根據如請求項 1 至 12 中任一項所述之方法製造的。



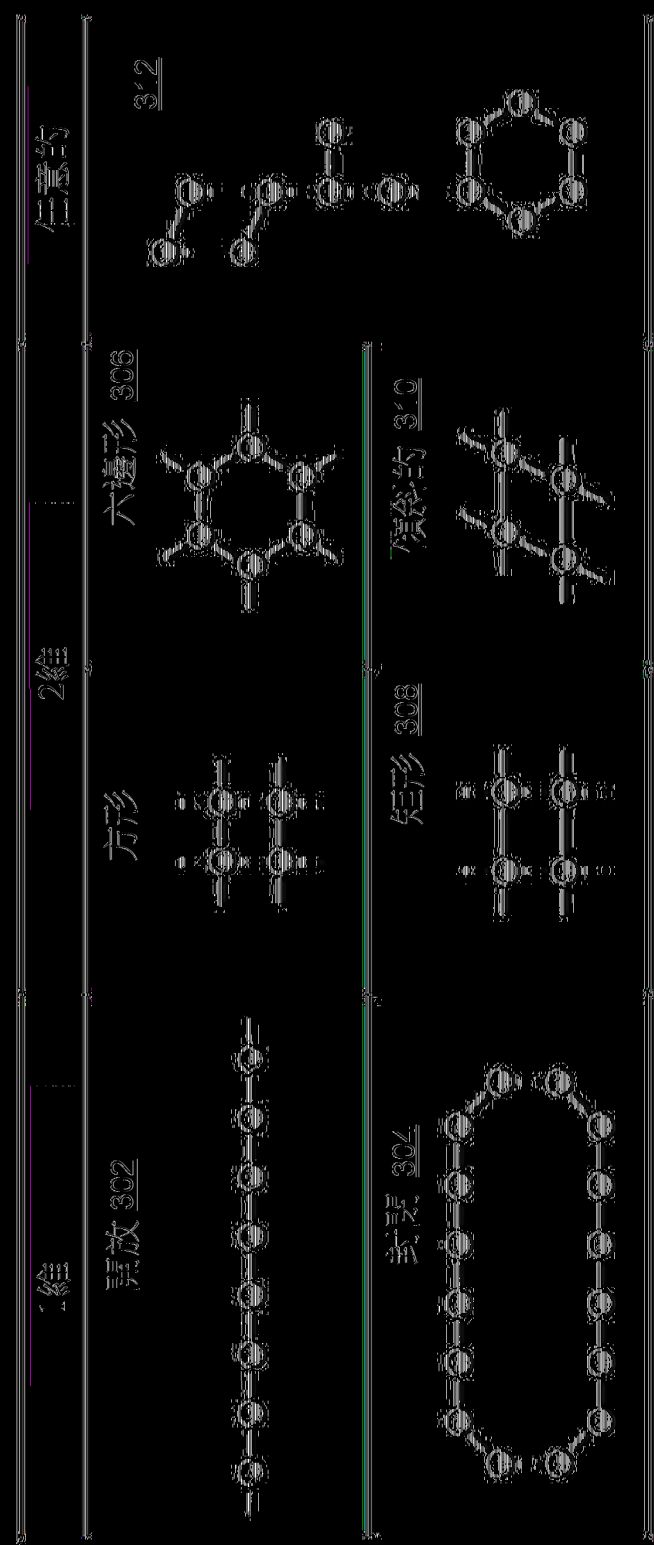
第1A圖



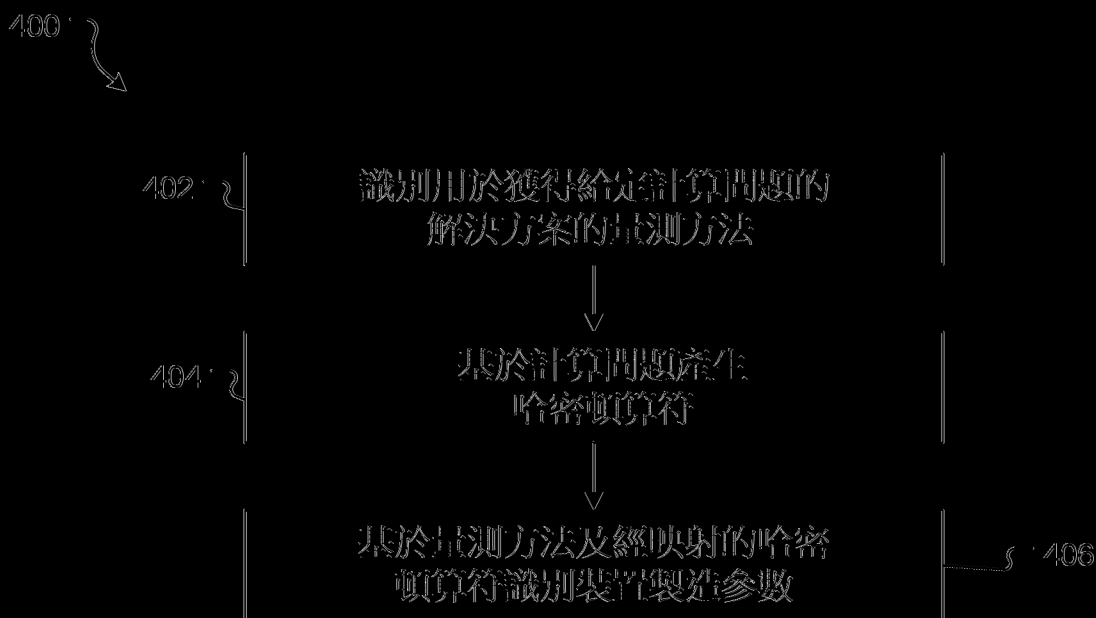
第1B圖



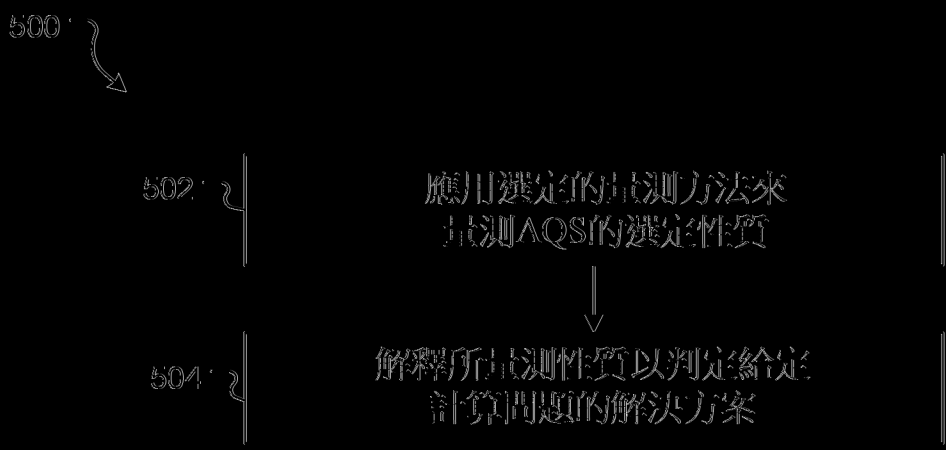
第21回



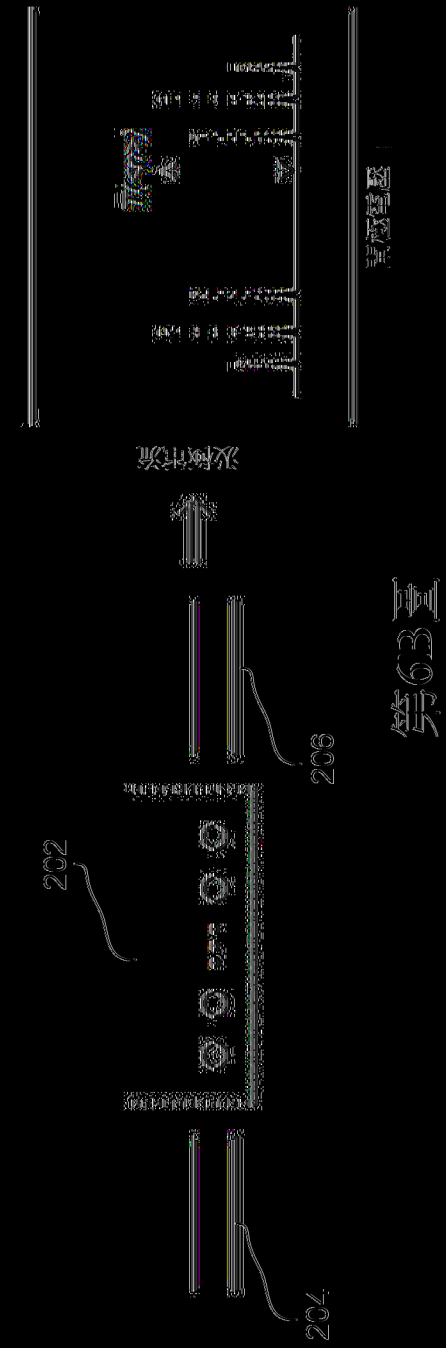
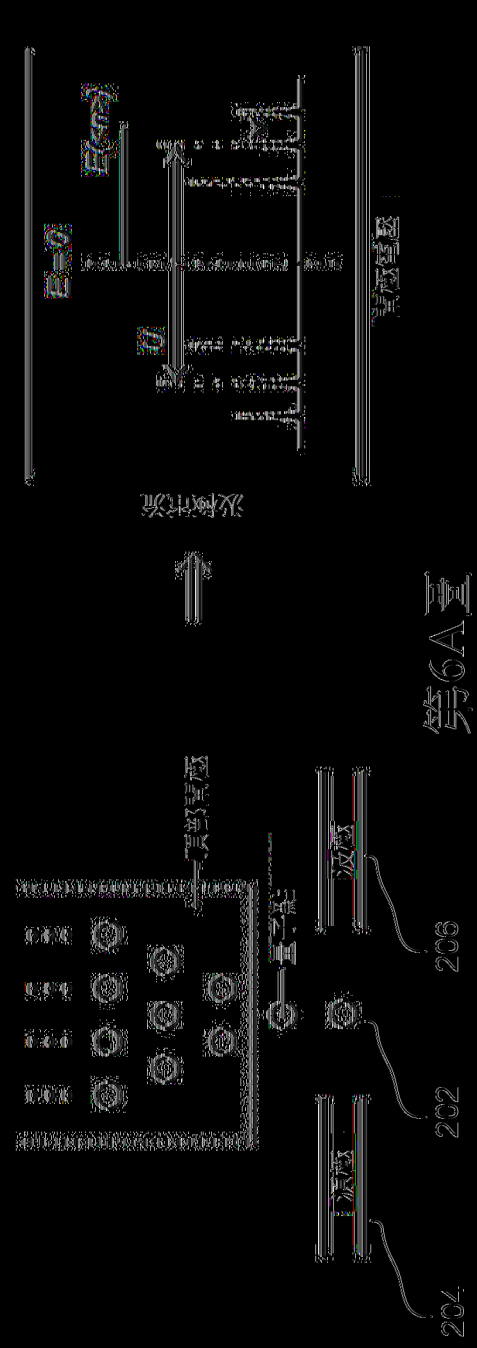
三

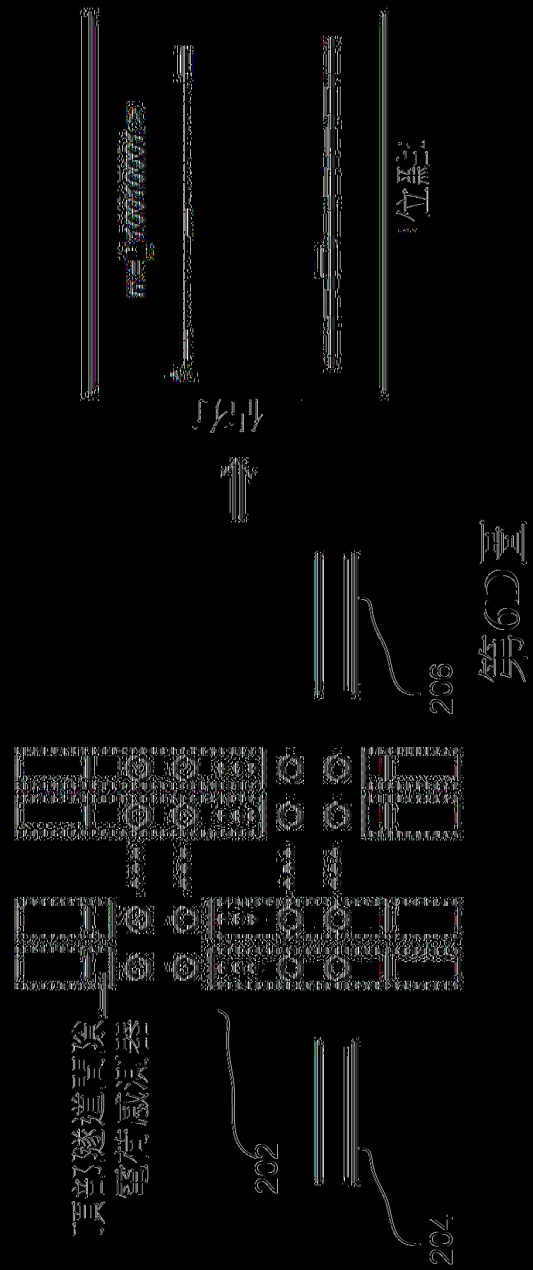
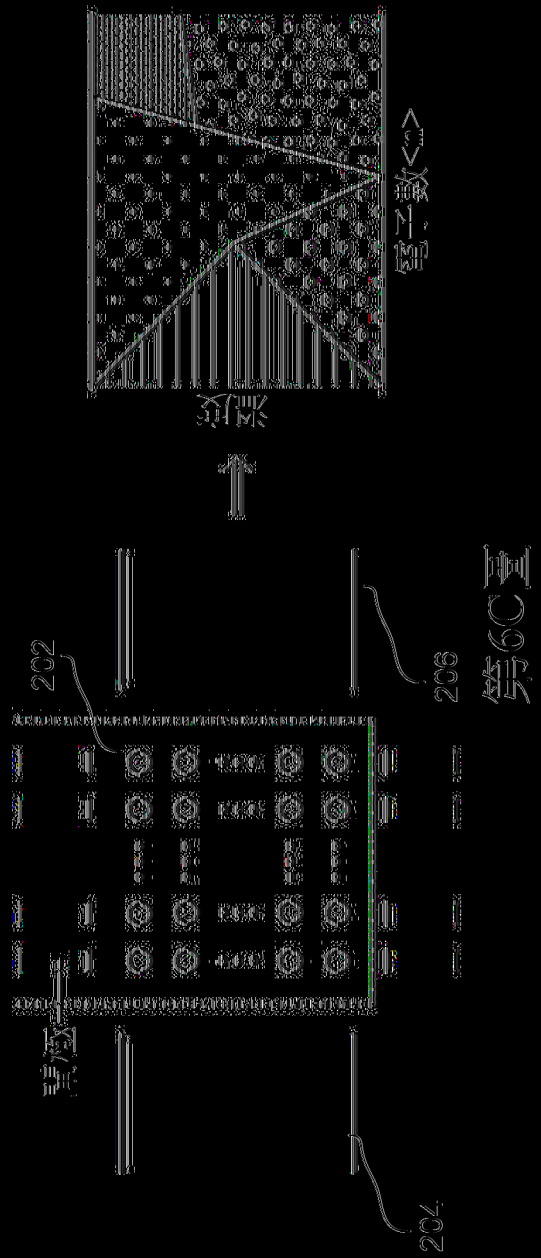


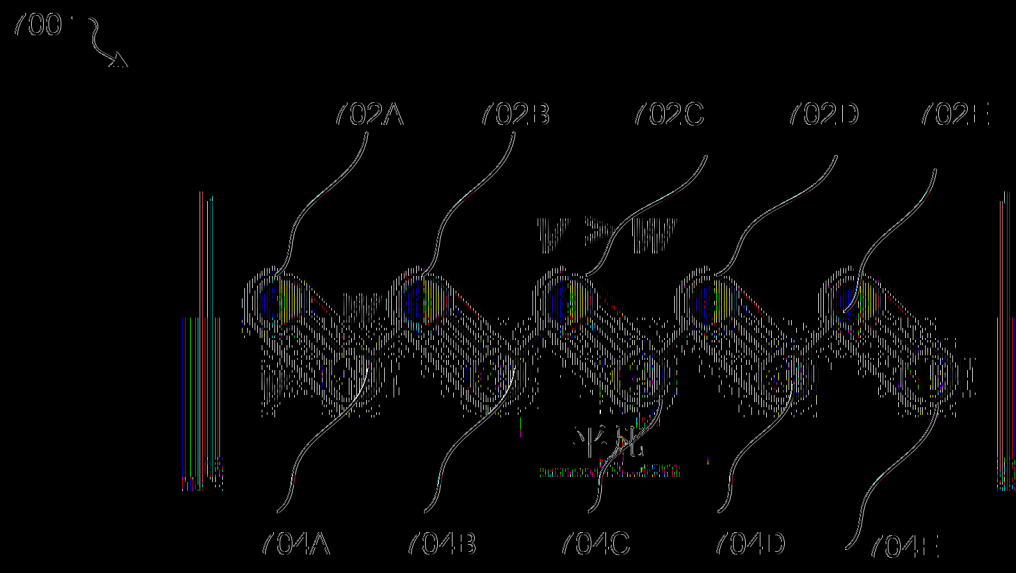
第4圖



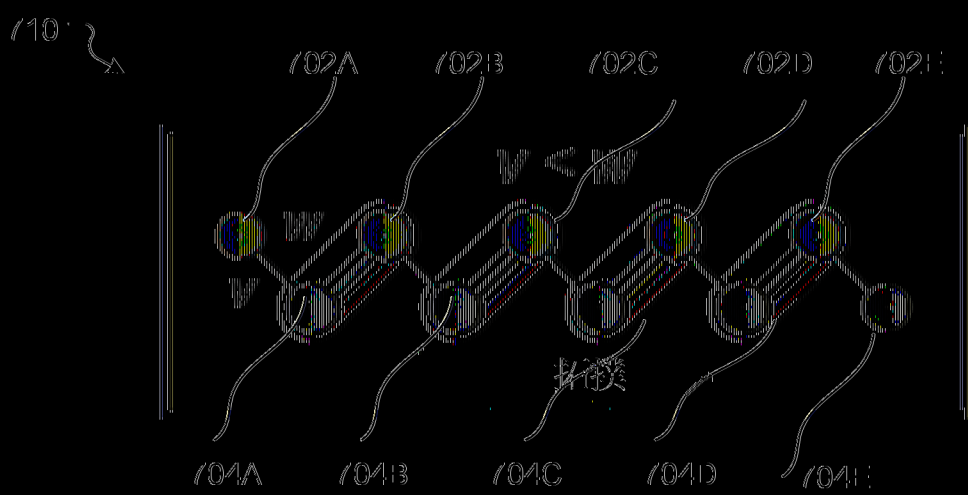
第5圖



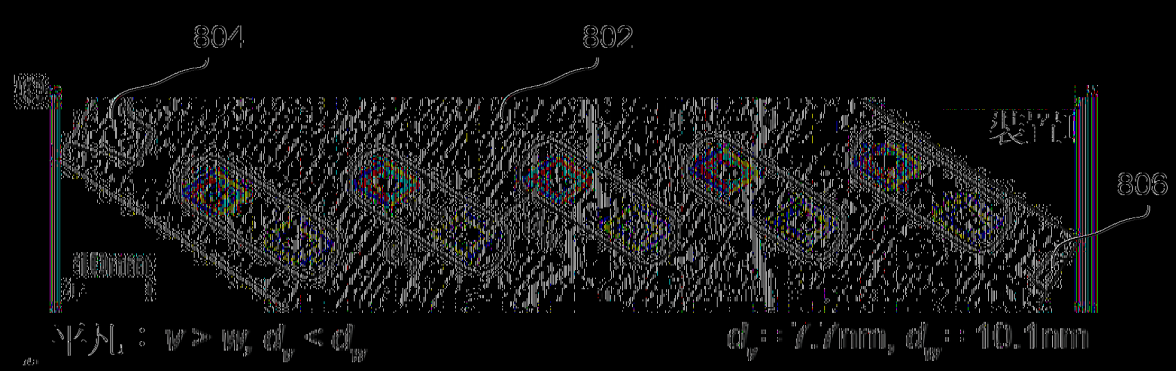




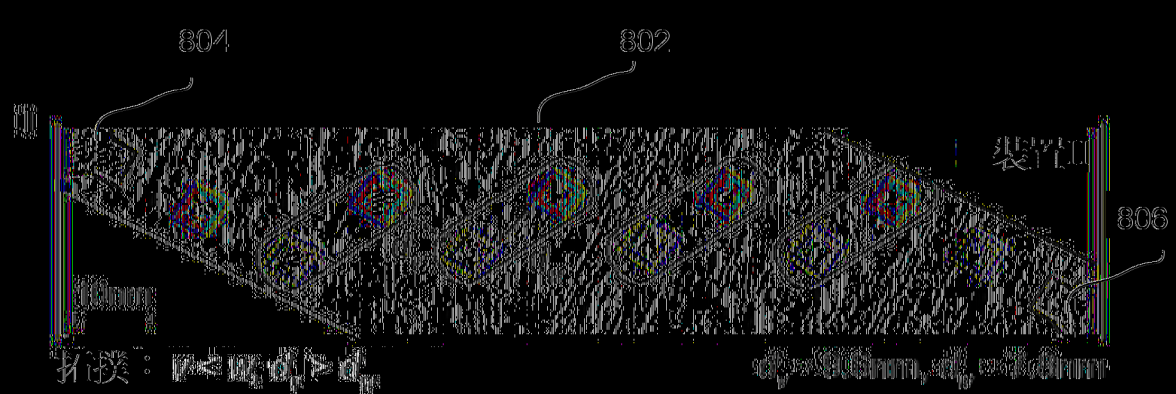
第1A圖



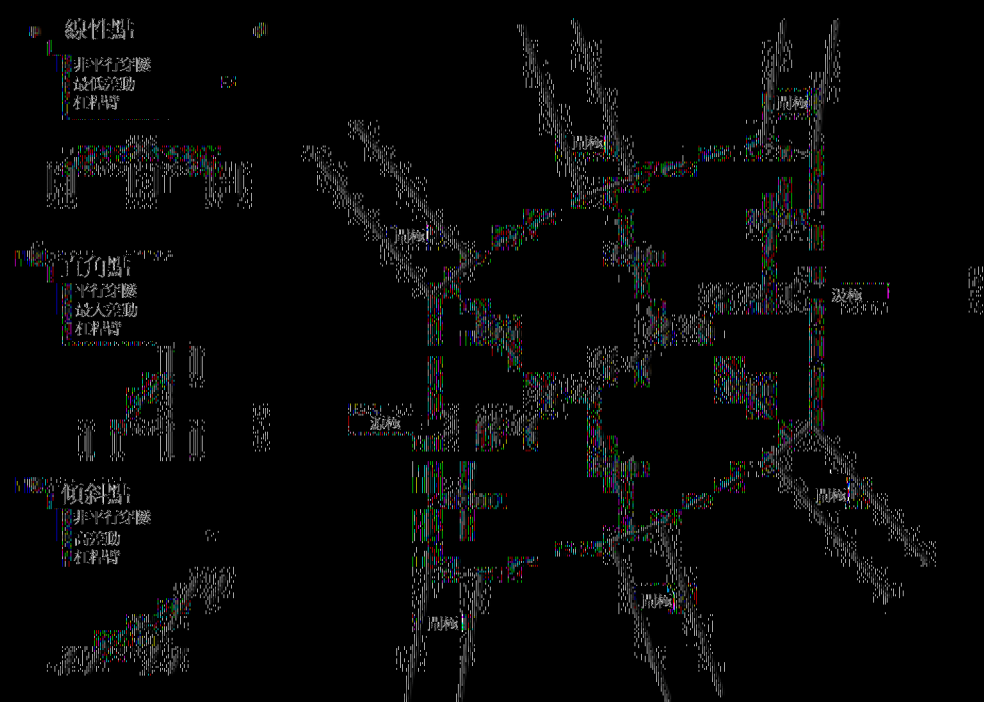
第1B圖



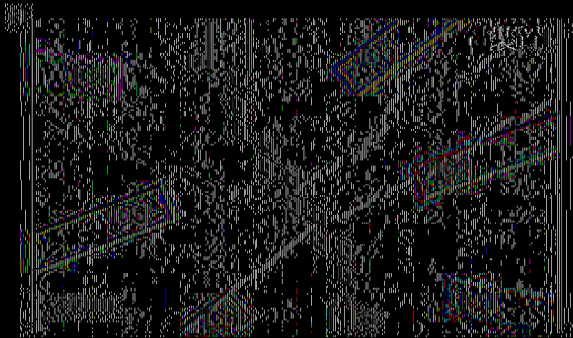
第8A圖



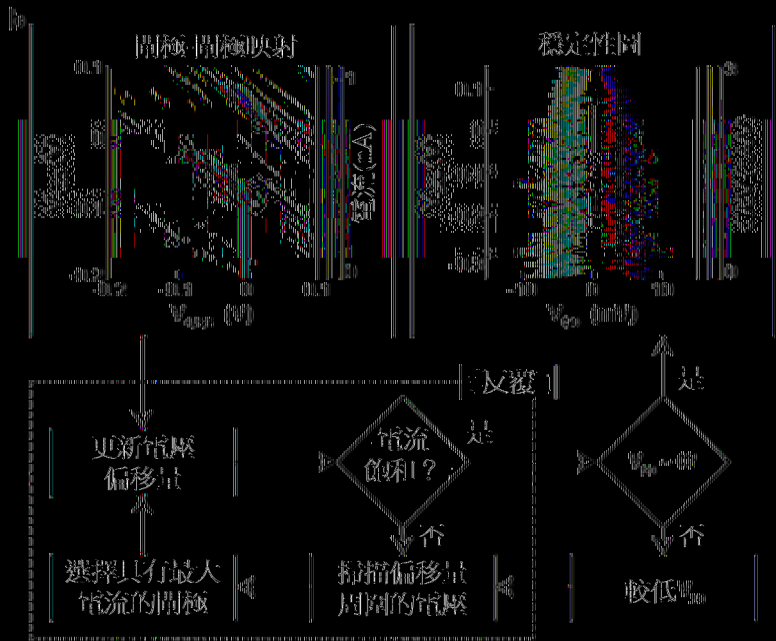
第8B圖



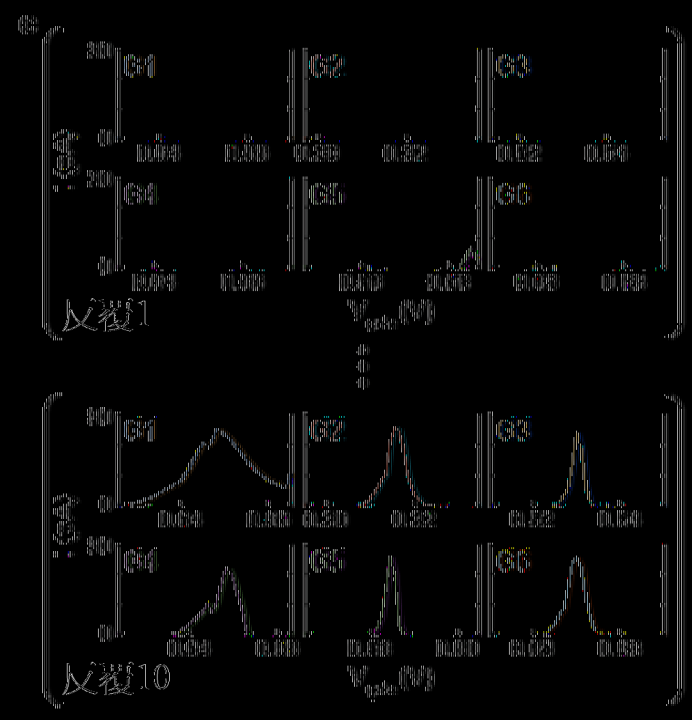
第8C圖



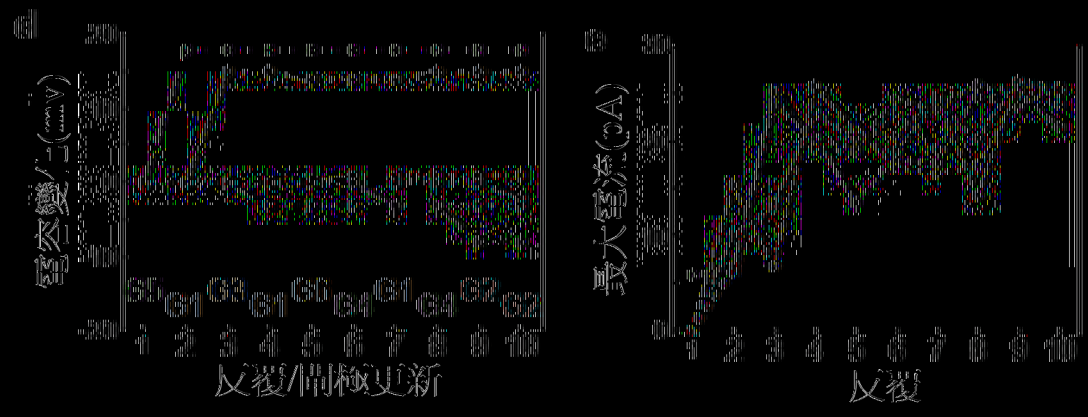
第9A圖



第9B圖

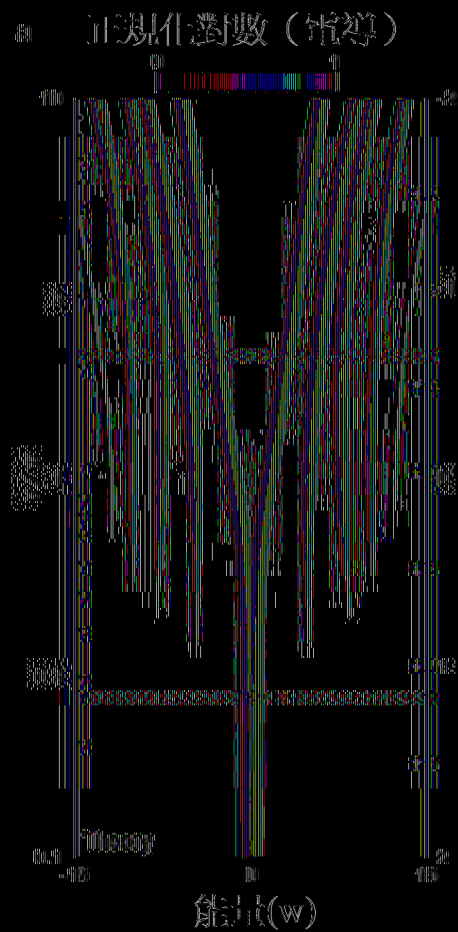


第9C圖

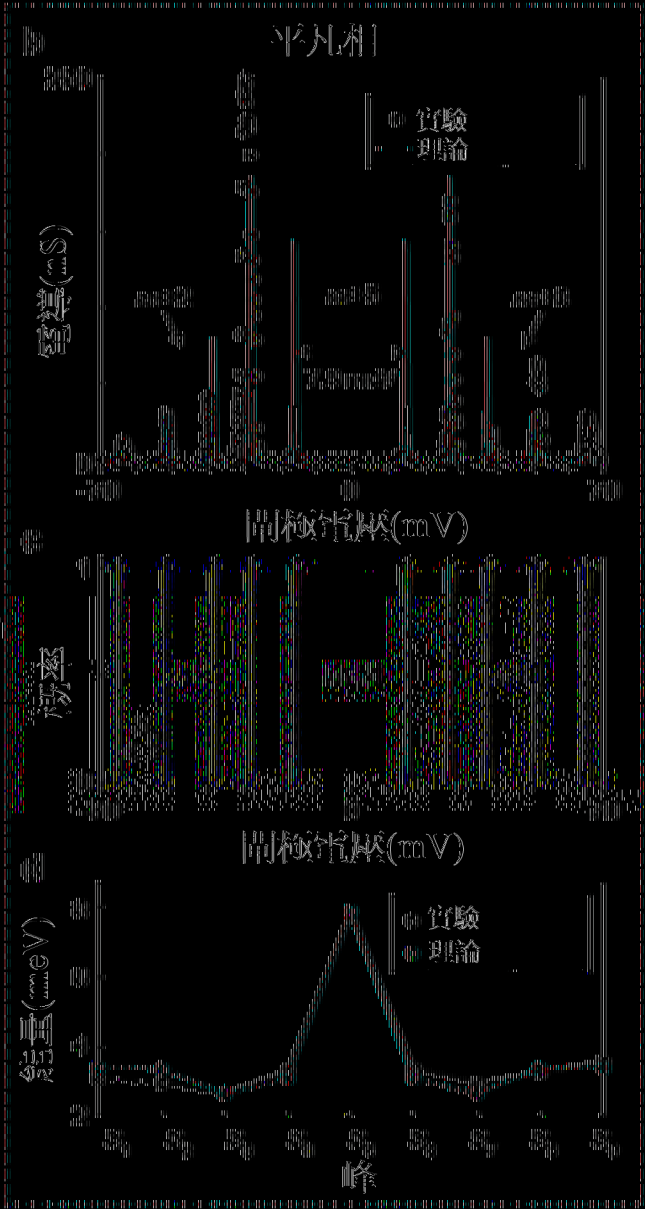


第9D圖

第9E圖



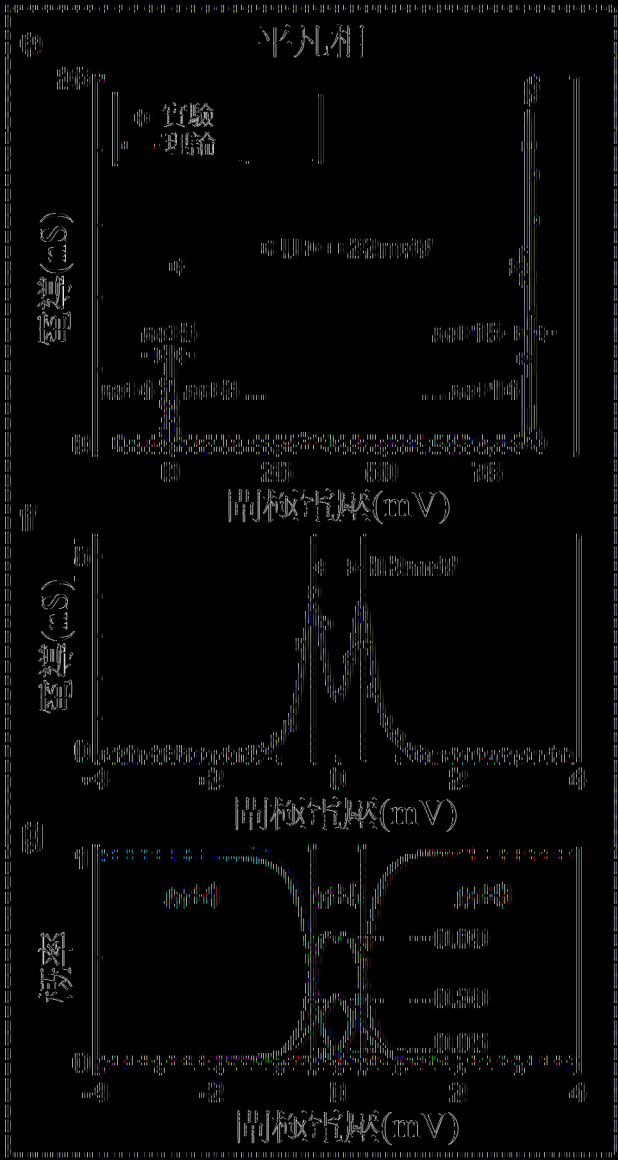
第10A圖



第10B圖

第10C圖

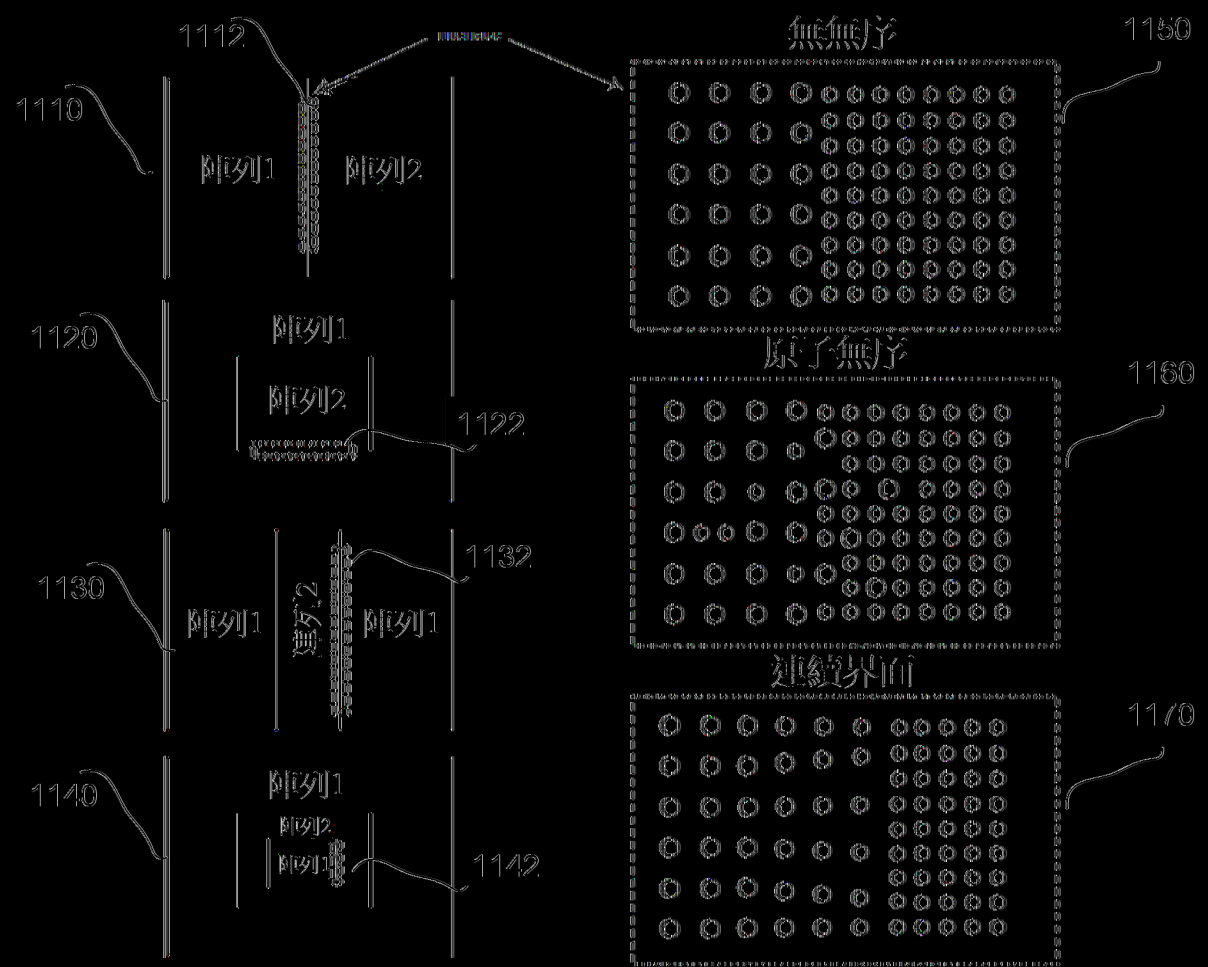
第10D圖



第10E圖

第10F圖

第10G圖



第11圖

【發明申請專利範圍】

【請求項1】 一種用於製造一模擬量子系統的方法，該方法包括以下步驟：

基於一計算問題產生一哈密頓算符，關於該計算問題，使用一或多種已識別的量測方法尋求一解決方案；

基於該一或多種已識別的量測方法及該哈密頓算符識別用於該模擬量子系統的模擬量子系統製造參數；以及

基於該等已識別的模擬量子系統製造參數來製造該模擬量子系統。

【請求項2】 如請求項1所述之方法，其中該方法進一步包括以下步驟：識別用於獲得該計算問題的該解決方案的該一或多種量測方法。

【請求項3】 如請求項1所述之方法，其中該一或多種量測方法選自包括以下各項中之至少一者的一列表：

量測該模擬量子系統的一量子點陣列的基態能量；

量測該模擬量子系統的源極引線與汲極引線之間的電子傳輸概率；

使用四點探針量測來量測該模擬量子系統的該量子點陣列上的一電壓及/或電容；以及

量測該模擬量子系統的一量子點陣列的一或多個量子點中的電子佔有。

【請求項4】 如請求項1所述之方法，其中該等系統製造參數包括以下各項中之至少一者：

該模擬量子系統的控制閘極的數目；

該模擬量子系統的源極引線的數目；

該模擬量子系統的汲極引線的數目；

該模擬量子系統的電荷感測器的數目；

該模擬量子系統的維度；

該模擬量子系統的該量子點陣列中的該等量子點的數目及/或幾何形狀；

該模擬量子系統的該量子點陣列中的相鄰量子點之間的間距；

該模擬量子系統的溫度；以及

該模擬量子系統的失諧。

【請求項5】 一種用於製造一用於模擬一電池的模擬量子系統的方法，該方法包括以下步驟：

基於模擬該電池的計算問題產生一哈密頓算符；

基於該哈密頓算符識別用於該模擬量子系統的系統製造參數且使用四點探針量測來量測一第一量子點陣列與一第二量子點陣列之間的一電壓及/或電容；以及

基於該等已識別的系統製造參數來製造該模擬量子系統。

【請求項6】 如請求項5所述之方法，其中該等系統製造參數包括以下各項中之至少一者：

該模擬量子系統的控制閘極的數目；

該模擬量子系統的源極引線的數目；

該模擬量子系統的汲極引線的數目；

該模擬量子系統的電荷感測器的數目；

該模擬量子系統的該第一量子點陣列及該第二量子點陣列的維度；

該第一量子點陣列及該第二量子點陣列中的量子點的數目及/或幾何形狀；

該第一量子點陣列及該第二量子點陣列中的相鄰量子點之間的間距；

該模擬量子系統的溫度；以及

該模擬量子系統的失諧。

【請求項7】 一種用於製造一用於模擬至少一個界面的模擬量子系統的方法，該方法包括以下步驟：

基於模擬一界面的計算問題產生一哈密頓算符；

基於該哈密頓算符識別用於該模擬量子系統的系統製造參數且使用四點探針量測來量測一第一量子點陣列與一第二量子點陣列之間的至少一個界面之間的一電壓及/或電容；以及

基於該等已識別的系統製造參數來製造該模擬量子系統。

【請求項8】 如請求項7所述之方法，其中該等系統製造參數包括以下各項中之至少一者：

該模擬量子系統的控制閘極的數目；

該模擬量子系統的源極引線的數目；

該模擬量子系統的汲極引線的數目；

該模擬量子系統的電荷感測器的數目；

該模擬量子系統的至少兩個量子點陣列的維度；

該至少兩個量子點陣列中的量子點的數目及/或幾何形狀；

該至少兩個量子點陣列中的相鄰量子點之間的間距；

該模擬量子系統的溫度；以及

該模擬量子系統的失諧。

【請求項9】 如請求項1、5或7中任一項所述之方法，其中製造該模擬量子系統包括：

製備一半導體基板的一主體層；

將該半導體層的乾淨晶體表面曝露於摻雜劑分子以在該曝露表面上產生一摻雜劑點陣列；

將該陣列狀表面退火以將該等摻雜劑點併入至該半導體層中；以及

形成一或多個控制閘極、源極引線及汲極引線。

【請求項10】 如請求項9所述之方法，其中該一或多個控制閘極形成於與該等摻雜劑點相同的一平面中。

【請求項11】 如請求項9所述之方法，其進一步包括在經退火的第二半導體層上方沉積一介電材料，其中該一或多個控制閘極形成於該介電材料上方。

【請求項12】 如請求項9所述之方法，其進一步包括在該模擬量子系統中形成一或多個電荷感測器以感測該一或多個摻雜劑點的電荷。

【請求項13】 一種用於解決一計算問題的方法，該方法包括以下步驟：

提供一模擬量子系統，該模擬量子系統包括：

一量子點陣列，該量子點陣列模擬一費米哈巴德模型，

複數個控制閘極，該複數個控制閘極用於改變哈巴德哈密頓算符參數，以及

一或多個源極引線及汲極引線，該一或多個源極引線及汲極引線用於量測通過該量子點陣列的電流；

應用一選定的量測方法來量測該模擬量子系統的一或多個性質；以及

解釋該模擬量子系統的所量測的該一或多個性質以判定該計算問題的一解決方案。

【請求項14】如請求項13所述之方法，其中該計算問題係一模擬問題或一最佳化問題。

【請求項15】如請求項13所述之方法，其中該選定的量測方法係以下各項中之至少一者：

量測該模擬量子系統的一量子點陣列的基態能量；

量測該模擬量子系統的源極引線與汲極引線之間的電子傳輸概率；

使用四點探針量測來量測該模擬量子系統的該量子點陣列上的一電壓及/或電容；或者

量測該模擬量子系統的該量子點陣列的一或多個量子點中的電子佔有。

【請求項16】如請求項15所述之方法，其中量測該量子點陣列的基態能量包括識別相鄰所量測電導峰之間的一能隙。

【請求項17】如請求項15所述之方法，其中量測該電子傳輸概率包括識別所量測電導峰的高度。

【請求項18】一種用於解決模擬一電池的一計算問題的方法，該方法包括以下步驟：

提供一模擬量子系統，該模擬量子系統包括：

至少兩個量子點陣列，該至少兩個量子點陣列模擬一費米哈巴德模型，

複數個控制閘極，該複數個控制閘極用於改變哈巴德哈密頓算符參數，以及

一或多個源極引線及汲極引線，該一或多個源極引線及汲極引線用於量測通過該陣列的電流；

使用四點探針量測來量測第一量子點陣列與第二量子點陣列之間的一電壓及/或電容；以及

解釋該模擬量子系統的該所量測電壓及/或電容以判定該計算問題的一解決方案。

【請求項19】一種用於解決模擬至少一個界面的一計算問題的方法，該方法包括以下步驟：

提供一模擬量子系統，該模擬量子系統包括：

至少兩個量子點陣列，該至少兩個量子點陣列模擬一費米哈巴德模型，

一界面，該界面界定於該至少兩個量子點陣列之間；

複數個控制閘極，該複數個控制閘極用於改變哈巴德哈密頓算符參數，以及

一或多個源極引線及汲極引線，該一或多個源極引線及汲極引線用於量測通過該至少兩個量子點陣列的電流；

應用四點探針量測來量測該界面上的一電壓及/或電容；以及

解釋該模擬量子系統的該所量測電壓及/或電容以判定模擬至少一個界面的該計算問題的一解決方案。

【請求項20】如請求項13、18或19中任一項所述之方法，其中該複數個控制閘極改變量子點的電化學電位及/或該等量子點之間的隧道耦合。

【請求項21】如請求項13、18或19中任一項所述之方法，其中該模擬量子系統包括至少一個電荷感測器，該至少一個電荷感測器用於量測該陣列的一或多個量子點中的電子佔有。

【請求項22】如請求項13、18或19任一項所述之方法，其中該等量子點為施體摻雜的矽量子點。

【請求項23】如請求項13、18或19中任一項所述之方法，其中該陣列係使用掃描穿隧顯微術製造的。

【請求項24】如請求項13、18或19中任一項所述之方法，其中該陣列為一維、二維或三維的。

【請求項25】一種模擬量子系統，該模擬量子系統係根據如請求項1、5或7中任一項所述之方法製造的。

